SAFAP 2010



Progettazione

Fabbricazione

Esercizio

Diagnostica

VENEZIA

13 - 14 MAGGIO 2010

Scuola Grande
San Giovanni Evangelista



SICUREZZA ED AFFIDABILITÀ DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

La gestione del rischio
dalla costruzione all'esercizio

Enel

L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.

Ministero della Salute

ISPESL

Istituto Superiore per la Prevenzione
e la Sicurezza del Lavoro

SAFAP 2010

SICUREZZA ED AFFIDABILITÀ DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

La gestione del rischio
dalla costruzione all'esercizio

ATTI DEL CONVEGNO

pubblicazione a cura di
D. Cogliani, E. D'Amico, S. Manca, G. Sabbagh - ISPESL

editing a cura di **charta-bureau.com**

stampa tipografia **Novagrafica** - *Camponogara VE*

finito di stampare a MAGGIO 2010

Comitato Promotore

ENEL: Gianfilippo Mancini
ISPESL: Antonio Moccaldi, Umberto Sacerdote

Comitato di Coordinamento

ENEL: Alfonso Gorlandi.
ISPESL: Vittorio Mazzocchi, Federico Ricci.
ISPESL Dip. di Venezia: Francesco Boella.

Organizzazione:

ISPESL DCC - Rosa Genovese, Sandra Manca.
ISPESL DTS - Daniela Gaetana Cogliani.
ISPESL DPO - Pier Francesco Benvenuto, Maddalena. Russo
ISPESL Dip. di Venezia – Edoardo D'Amico.

Segreteria:

ISPESL – Gianluca Saputi, Stefano Sperini, Gabriele Sabbagh, Jessica Longo, Giulia Colace.

Comitato Scientifico

AIPND: Ezio Tuberosa
ANIMA: Federico Cacciatori.
CENTRO SVILUPPO MATERIALI: Paolo Folgarait .
CTI: Matteo Cannerozzi, Giovanni Riva.
ENEL: Giuseppe Garavaglia, Claudio Teloni.
ENTE DELLA ZONA INDUSTRIALE di P. Marghera: Gianluca Palma, Egisto Rampado.
ISPESL: Carlo De Petris, Corrado Delle Site, Fausto Di Tosto, Paolo Pittiglio, Andrea Tonti.
ISTITUTO ITALIANO SALDATURA: Chiara Servetto.
MINISTERO SVILUPPO ECONOMICO: Vincenzo Correggia.
POLITECNICO DI BARI: Piero Masini.
RTM BREDA: Gunther Merckling.
SARAS: Riccardo Cozza.
UNIVERSITÀ ROMA1: Claudio Caneva, Enrico Sciubba.

Premessa

Il convegno SAFAP, giunto alla sua quinta edizione, rappresenta un importante momento di approfondimento di problematiche riguardanti la sicurezza e l'affidabilità delle attrezzature a pressione.
Attraverso le diverse sessioni, dalla plenaria a quelle tematiche, sono stati affrontati gli aspetti emergenti, teorici e applicativi, legati a progettazione, fabbricazione, utilizzo e manutenzione di apparecchi ed impianti, dedicando particolare attenzione alle esperienze nell'applicazione della legislazione vigente e all'utilizzo di metodiche di analisi e indagine all'avanguardia per quanto riguarda le prove non distruttive, l'integrità strutturale e l'analisi dei rischi.
Il quadro che ne risulta fornisce una panoramica, non esaustiva ma sicuramente significativa, dello "stato dell'arte" del settore, utile ausilio per quanti operano e ulteriore stimolo per sviluppare e acquisire sempre più approfondite conoscenze in materia.
Il risultato premia l'impegno e il lavoro quotidiano dei molti tecnici e ricercatori che si occupano quotidianamente a vario titolo di attrezzature a pressione, non solo quelli presenti in questi atti, il cui operato ha potuto essere divulgato grazie all'impegno nell'ambito di una collaborazione ormai pluriennale tra l'ISPESL e l'ENEL, la partecipazione degli sponsor tecnici AssoGasLiquidi, Ente della Zona Industriale di Porto Marghera, SAPIO e SARAS e con il patrocinio dell'AIPnD , del CTI e del Ministero della Salute.

Il Comitato promotore

APERTURA DEI LAVORI

Ore 9.30 - 10.00
Intervento e saluto delle autorità

SESSIONE PLENARIA

Ore 10.00 – 13.00
Coordinatori: V. Mazzocchi (ISPESL) - A. Gorlandi (ENEL)

10.00-10.30 *V. Mazzocchi*	Evoluzione normativa e legislativa nel settore delle attrezzature a pressione
10.30-11.00 *S. Valery - S. Di Pietro*	La sicurezza in Enel: il miglioramento continuo con le imprese appaltatrici
11.00-11.30 *F. Ricci - D. Ghidetti*	I risvolti applicativi sull'esercizio dell'attrezzatura di lavoro alla luce del d.Lgs 81/2008 (attuazione art. 71)
11.30-11.45 *R. Cozza*	Modelli organizzativi, sicurezza e affidabilità
11.45-12.00 *R. Caroselli*	La sicurezza delle attrezzature a pressione: L'esperienza ASSOGASLIQUIDI
12.00-12.15 *L. Grimolizzi - A. Marigo*	Il Gruppo SAPIO per la ricerca nel settore dei gas tecnici e medicinali.
12.15-12.30 *G. Bianchini*	Sistema MOSE: il modello organizzativo per l'implementazione della sicurezza
12.30-12.45 *M. Cannerozzi de Grazia* *G. Riva - G. Pinna*	Contributo del CTI all'aggiornamento delle norme italiane ed europee nell'ambito degli impianti a pressione e relativa organizzazione
12.45-13.00 *A. Porco*	Problematiche della qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive di tipo innovativo

SESSIONE TEMATICA

NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

Ore 14.00 – 18.00

Coordinatori: M. Cannerozzi (CTI) - A. Sala (Concert)

14.00-14.20 *M. Cannerozzi de Grazia*	Procedura approfondita di valutazione globale di conformità degli insiemi: Orientamento e proposta di attuazione del Forum europeo degli O.N. (CABF/PED)
14.20-14.40 *V. Annoscia - N. Pecere* *A.M. Altieri*	La valutazione del rischio sismico nella progettazione delle attrezzature a pressione
14.40-15.00 *E. Leoni - F. Rossi*	Aspetti critici per la verifica sismica secondo le NTC dei serbatoi criogenici in pressione
15.00-15.20 *F. Lorino* *G. Perozzi*	La progettazione secondo il codice EN 13445 ed ASME VIII div 1 degli apparecchi in pressione in regime di scorrimento viscoso. Confronto tra differenti metodologie di calcolo
15.20-15.40 *S. Pagano* *G.L. Cosso*	Procedure di calcolo numerico per l'analisi strutturale di componenti in creep basate sulla definizione della "reference stress"
15.40-16.00 *A. Iacino* *F. Giacobbe*	Interventi di riparazione su colonne. Confronto esito calcolo strutturale analitico e agli elementi finiti
16.00-16.20 *A. Dragonetti - L. Gaetani* *F. Vivio*	Analisi a creep di saldature con metodi DBA soggette a carichi combinati esterni di pressione e temperatura
16.20-16.40 *G. de Gennaro* *M. Godono - M. Nardelli* *G. Di Palmo*	Valutazione e gestione del rischio delle camere iperbariche nelle strutture sanitarie
16.40-17.00 *G. Sferruzza* *M. Godono*	La messa in servizio di una Camera Iperbarica nella Repubblica di San Marino
17.00-17.20 *M.A. Pierdominici* *E. Artenio*	Decreto legislativo 27 Gennaio 2010 – Recepimento della direttiva quadro 2008/68/CE
17.20-17.40 *M. G. Gnoni - G. Lettera* *P. Tundo* *A. Tonti - A. Fiodo*	Proposta di una piattaforma RFID-based per la gestione delle verifiche di apparecchi a pressione

SESSIONE TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

Ore 14.00 – 18.00

Coordinatori: C. De Petris (ISPESL) - C. Caneva (AIPnD)

14.00-14.20	
G. Nardoni - M. Certo *M. Feroldi - P. Nardoni* *D. Nardoni*	Utilizzo dell'eco difratto nelle tecniche ad ultrasuoni TOFD, PHASED ARRAY, PULSE-ECO per rilevare l'altezza dei difetti nelle saldature.
14.20-14.40	
G. Augugliaro - C. De Petris *C. Mennuti - P. Quaresima* *P. Lenzuni*	Analisi EA di grandi serbatoi interrati per GPL
14.40-15.00	
F. Rossetti *R. Invernici* *F. Zullo*	La valutazione sullo stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica d'integrità, in accordo all'art. 16 del D.M. 329/04: benefici derivanti dall'ispezione con campo remoto (RFT) e correnti indotte (ET)
15.00-15.20	
G. Berti *F. De Marco* *D. Pinciroli*	Efficacia ispettiva e solidità della metodica "XRD in loco" per il rilevamento di potenziali fenomeni a creep
15.20-15.40	
D. Corò	L'utilizzo della radiografia digitale (DR) nell'ispezione delle attrezzature a pressione
15.40-16.00	
G. Gusmano *D. Lazzaro - C. Mennuti* *G. Montesperelli - P. Travaglia*	Rilevamento di fenomeni corrosivi su acciaio P01 con il metodo di Emissione Acustica.
16.00-16.20	
E. Pichini *U. Giosafatto* *A. Liedl*	Tecniche termografiche per la progettazione e la manutenzione delle attrezzature a pressione
16.20-16.40	
G. Franceschini *G. A. Zuccarello*	I serbatoi di stoccaggio ammoniaca a pressione atmosferica: Fitness For Service, analisi Leak Before Break, selezione di strategie ispettive non intrusive consolidate (UT TOFD e Phased Array) e possibili sviluppi con Emissioni Acustiche (AE)
16.40-17.00	
F. Bertoncini - M. Raugi *F. Turcu*	Studio dell'applicabilità della tecnica ad onde guidate nell'ambito dei fluidi criogenici
17.00-17.20	
G. Augugliaro - C. De Petris *A. Di Mambro* *C. Brutti - M. Biancolini*	Valutazione dell'integrità strutturale di piccoli serbatoi GPL basata sull'interpretazione di dati di prova di Emissione Acustica con tecnica frattale
17.20-17.40	
L. Giuliani	La tecnologia Terahertz per i controlli non distruttivi

SESSIONE TEMATICA
INTEGRITÀ STRUTTURALE DI MATERIALI E COMPONENTI

Ore 8.30 - 13.20

Coordinatori: L. Pera (ISPESL) - G. Merkling (RTM Breda)

8.40-9.00 *G. Calvano* *A. De Musso*	Analisi e vita residua per piping soggetto a D.M. 329/04.
9.00-9.20 *G. Mari - R. Lauri* *C. Metaponte* *V. Romani*	Iter di individuazione delle criticità e studio di un processo svolto in un reattore chimico finalizzati al raggiungimento di elevati standard di sicurezza
9.20-9.40 *S. Galasso - P. Mineo*	Alfa Consulting e la "Specifica tecnica applicativa del DM 329/04 (per la messa in servizio e l'utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione): dalla ricerca e sviluppo all'esperienza operativa
9.40-10.00 *G. Pitti* *N. Palumbo*	La redazione della Relazione Tecnica di cui all'art. 6 del D.M. 329/04: case history nello stabilimento Polimeri Europa S.p.A. di Mantova
10.00-10.20 *G. Sferruzza* *G. Canale - G. Cevasco* *F. Sabatini*	Verifiche a campione sull'idoneità dei dispositivi di sicurezza posti a protezione della tubazioni esistenti denunciate in accordo all'art. 16 del D.M.329/04
10.20-10.40 *A. Alvino - D. Lega* *F. Giacobbe* *V. Mazzocchi* *A. Rinaldi*	Fenomeni di degrado per esercizio ad alte temperature su acciai ad alto tenore di Ni Cr
10.40-11.00 *M. De Marco - E. Ferrari* *R. Grandicelli* *C. Servetto*	Failure analysis di un tubo piolinato prelevato da una caldaia a biomasse vegetali
11.00-11.20 *R. Balistreri* *E. Pichini* *R. Cozza - M. Serra*	Riparazione temporanea di attrezzature in pressione mediante applicazione di fibre di carbonio e resina
11.20-11.40 *F. Giacobbe - A. Polimeni* *M.A. Russo - L. Romani* *A. Scaglione - S. Guarnaccia* *A. Gitto*	Riparazione di tubazioni ai sensi dell'art. 14 del D.M. 329/04
11.40-12.00 *R. Nicosia*	Gli interventi di eliminazione perdite con impianto in marcia come valido sistema di riparazione temporanea.

12.00-12.20
G. Augugliaro - F. Brini
C. De Petris - G. Inguì
C. Mennuti

Approccio valutativo strutturato per la verifica d'integrità di attrezzature a pressione ai fini della riqualificazione periodica

12.20-12.40
S. Benedetto
P. Chiantella - G. Chiofalo
A. Scaglione

Verifica di integrità di serbatoi tumulati per stoccaggio di GPL

12.40-13.00
M. Larice
G. Frare
L. Tardivo

Affidabilità e sicurezza di esercizio di generatori di vapore eserciti oltre i 45 anni in centrali termoelettriche di potenza – esperienze operative

13.00-13.20
G. Picciolo
A. Tonti
A. Barison

Valutazione della vita residua di materiali in regime di scorrimento viscoso a caldo di una attrezzatura a pressione con strumentazione di misura e controllo di processo conforme alla Norma CEI EN 61508 (SIL): risultati dell'applicazione reale in un impianto di raffineria

SESSIONE TEMATICA
ANALISI DEI RISCHI

Ore 8.30 - 13.00

Coordinatori: M. Mariani - F. Ricci (ISPESL)

8.40-9.00 *F. Giacobbe - A. Polimeni* *P. Sergi - M.A. Russo* *F. Olivo* *S. Morelli*	Prove di scoppio su bombole GPL
9.00-9.20 *G. Mulè - G. Mulè*	Pressure Equipment Risk Analysis Learning from Accident
9.20-9.40 *G. Argento - V. Nastasi*	DM 293/01 e DLgs 238/95: Controllo di incidenti rilevanti nei porti industriali, petroliferi commerciali. Un esempio applicativo: Il porto petrolifero di Gela
9.40-10.00 *A. Nuzzo* *E. De Benedictis - F. Ingravallo*	Esempio di applicazione del metodo RBI "Risk based Inspection" nell'ottica di un nuovo approccio agli adempimenti imposti dal DM 1 dicembre 2004, n.329
10.00-10.20 *P.A. Bragatto - P. Pittiglio* *S. Ansaldi - P. Agnello*	Gestione integrata dei controlli delle attrezzature a pressione negli stabilimenti Seveso
10.20-10.40 *F. Ricci - V. Corregia* *C. Delle Site* *A. Faragnoli* *G. Canale*	Periodicità delle verifiche e dei controlli attrezzature a pressione: riferimenti legislativi metodologie analitiche
10.40-11.00 *D. Nevoso - A. Scaglione* *P. Chiantella*	Criterio per la valutazione di criticità delle macchine nel settore Oil&Gas
11.00-11.20 *C. Guarino* *A. Agus*	Studio Risk Based Inspection (RBI) relativo a Pressure Safety Valve (PSV) ed applicazione del DM 329/04 art.10 comma 5
11.20-11.40 *G. Boccardi – R. Bubbico* *G.P. Celata* *R. Trinchieri* *F. Di Tosto*	Studio Teorico-Sperimentale sulle Perdite di Carico Concentrate e Ripartite in Efflusso Bifase
11.40-12.00 *V. De Lisio* *C. Di Girolamo* *C. Robino*	Dispositivi a disco di rottura: requisiti principali per la corretta installazione e manutenzione
12.00-12.20 *G. Boccardi - G. P. Celata* *F. Di Tosto* *Trinchieri*	Programma per il Dimensionamento delle Valvole di Sicurezza in Bifase secondo ISO/DIS4126-10 e Confronto con Dati Sperimentali

12.20-12.40
L. Greco
A. Padoan

Dimensionamento dei dispositivi di scarico di emergenza. con efflusso bifase

12.40-13.00
N. Altamura - V. Annoscia
D. Sallustio

Deterioramento dei serbatoi criogenici

SESSIONE POSTER

Ore 14.00 - 15.00

1

F. Giacobbe
A. Scaglione - S. Guarnaccia
D. Geraci - L. Monica
M. Madonna

L'approccio risk management nei processi di manutenzione per il monitoraggio delle attrezzature a pressione

2

V. Nastasi - G. Argento

Impianti frigoriferi, di condizionamento e di climatizzazione costruiti ed esercitati in conformità al D.lgs. 93/2000 (PED), al DM 329/04 e al D.lgs. 81/2008 mod. D.lgs. 106/09

3

A. De Musso
M.F.S. De Musso

Attrezzature o insiemi a pressione (autoclavi) funzionanti a temperatura maggiore di 100°C. La sicurezza nei cicli di funzionamento in continuo applicati agli apparecchi di tintura dei filati in corda e della cottura di alimenti in scatola

4

G. Inguì

Le fasi essenziali di vita di una attrezzatura/insieme a pressione

5

A. Tonti
P. Bragatto

La rappresentazione digitale parametrica di attrezzature a pressione.

6

A. Alvino - D. Lega
F. Giacobbe
A. Rinaldi
D. Ramires

Caratterizzazione microstrutturale di acciai eserciti in impianti di steam reforming.

7

F. Giacobbe
V. Mancuso
M. Lanzani
C. Sampietri
A. Branca

Confronto esito valutazioni sullo scorrimento viscoso di tubazioni in A335 P22 con oltre 200.000 ore di esercizio

8

C. Delle Site
A. Silvetti
R. Iovene

ENOS: un programma di calcolo integrato per la valutazione della vita consumata a scorrimento viscoso

9

G. Franceschini
G. Zuccarello - F. Zichichi

La valutazione dello stato di conservazione ed efficienza della tubazione in un impianto produzione Ammoniaca ed Urea: un approccio sistematico per l'ispezione e la manutenzione delle attrezzature a pressione in conformità al D.M. 329/04 ed introduzione alla Risk Based Inspection

10

A. Alvino - F. Ciuffa
D. Lega
D. Ramires

Metodologie di indagine microstrutturale per la valutazione del danno da scorrimento viscoso su acciai per impiego ad alta temperatura

11

N. Palumbo
G. Gurnari

Illustrazione della Procedura di Hauptmanns

12

D. Sallustio - N. Altamura
M. Godono

La sicurezza elettrica nelle camere iperbariche

13

A. Rinaldi - A. Alvino
D. Lega - F. Giacobbe
V. Mazzocchi
E. Pichini

La modellazione microstrutturale e lo studio del danno in acciai ad alta temperatura

14

G. Berti
F. de Marco
E. Tolle

Tecnologie diffrattometriche alla nanoscala: nuove frontiere di sviluppo e normazione

15

R. Balestrieri - E. Carducci
G. Giannelli - G. Gorrino
I. Mazzarelli - G. Mella
P. Morucchio - A. Pallano
F. Palombo - E. Pichini
G. Sferruzza

L'Approccio normativo per la gestione delle riparazioni temporanee di attrezzature a pressione

sessione PLENARIA

La sicurezza in Enel: il miglioramento continuo con le imprese appaltatrici

*S. Valery**
*S. Di Pietro***

** Responsabile Funzione Safety ed Ambiente Divisione Generazione ed Energy Management e Divisione Mercato di Enel*
***Responsabile Unità Safety Divisione Generazione ed Energy Management e Divisione Mercato di Enel*

1. PREMESSA

La mission di Enel sancisce il principio di operare nel rispetto della sicurezza delle persone: un valore che si declina in ogni ambito aziendale e coinvolge tutti coloro che lavorano in azienda, siano esse risorse interne o esterne. Ed è proprio la prevenzione dei rischi per la salute e la sicurezza durante l'esecuzione di attività da parte di aziende o di professionisti esterni che costituisce da sempre uno dei punti di maggiore attenzione nel sistema di gestione della sicurezza nel gruppo Enel. Durante queste attività, infatti, si creano condizioni di rischio nuove e diverse rispetto a quelle normalmente presenti, che richiedono la necessità di implementare una gestione preventiva e sistematica della sicurezza che coinvolga sia il Datore di lavoro Committente sia i diversi appaltatori incaricati delle attività e le figure preposte alla gestione e controllo della sicurezza con l'obiettivo condiviso e non negoziabile del miglioramento continuo.

Nell'ambito di una politica improntata al miglioramento continuo attraverso l'adozione di un Sistema di Gestione della Sicurezza conforme allo standard OHSAS 18001 e nell'ottica di adottare e diffondere in tutti luoghi di lavoro un unico modo di considerare la sicurezza quale tema di responsabilità sociale e dovere imprescindibile, Enel stabilisce un insieme di valori ai quali tutte le imprese che entrano in contatto con essa debbano necessariamente ispirare le proprie condotte.

Nella pratica Enel ha l'obiettivo prefissato che rimane quello dello ***"zero infortuni"***. Tale obiettivo è utilizzato come monito e via maestra per ogni azione del nostro lavoro, per poter svolgere sempre al meglio la nostra attività, in cui la sicurezza e la salvaguardia della salute di tutti quanti lavorano in Enel e con Enel sono al primo posto del nostro continuo e costante impegno.

2. IL FENOMENO INFORTUNISTICO

Il numero di infortuni sul lavoro occorsi ai dipendenti Enel[1] e che abbiano comportato assenze dal lavoro di almeno un giorno è in **diminuzione** da molti anni (nel 2009: 391) – fig. 1.

In deroga a una prassi abbastanza consolidata – che prevede la rilevazione dei soli infortuni con prognosi di recupero superiore a 3 giorni – Enel rileva anche quelli con prognosi di recupero compresa tra 1 e 3 giorni che in Italia sono in franchigia assicurativa INAIL.

I due indici infortunistici utilizzati tra i principali per verificare la valenza delle azioni sulla sicurezza – cioè l'indice di frequenza (rapporto tra numero degli infortuni e ore lavorate espresse in milioni) e l'indice di gravità (rapporto tra numero di giorni di inattività a causa di infortuni e ore lavorate espresse in centinaia di migliaia) continuano nel corso degli anni a ridursi – fig. 2.

Il Gruppo, infatti, presenta, per l'indice di frequenza, un valore pari a 8,16 nel 2005 e 3,72 nel 2009 e, per l'indice di gravità, un valore diminuito da 0,27 nel 2005 a 0,14 nel 2009.

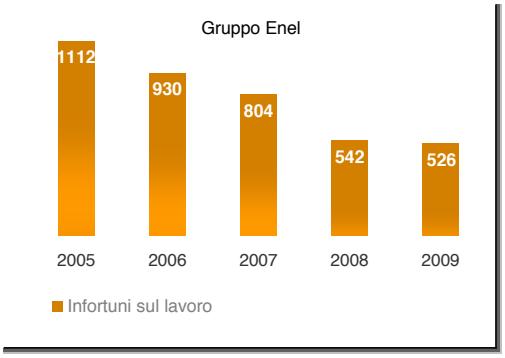


Fig. 1 - Infortuni occorsi a dipendenti Enel (n)

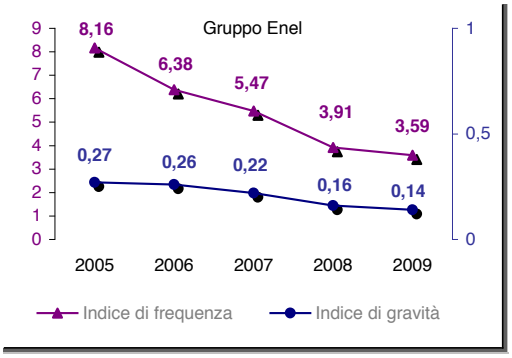


Fig. 2 – Andamento degli indici di frequenza e gravità

Dei 526 infortuni verificatisi nel 2009 il 27% è dovuto a caduta o scivolamento, il 19% è relativo a incidenti stradali, il 19% è stato provocato da urto, scorrimento o taglio indotto da cose in movimento, il 15% è dovuto a sforzi o movimenti maldestri e il solo 6% rientra nel gruppo degli infortuni elettrici.

Nel 2009 si sono registrati tra i dipendenti Enel 37 infortuni gravi (di cui 8 in Italia e 29 in Countries estere) e 3 infortuni mortali (1 in Italia causato da incidente automobilistico e 2 in Countires Estere).

Per quanto riguarda i lavoratori di aziende appaltatrici impegnate in lavori per conto Enel, nel 2009 si è registrata – con 144 casi, di cui 17 mortali (3 in Italia e 14 in Countires estere) e 127 gravi (5 in Italia, 122 in Countries estere) – un'inversione di tendenza rispetto al miglioramento ottenuto negli anni precedenti2 [1].

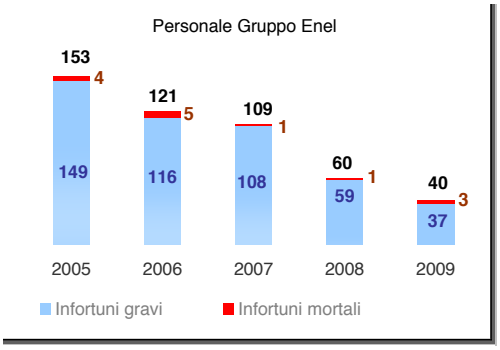


Fig. 3 – Infortuni gravi e mortali personale Enel

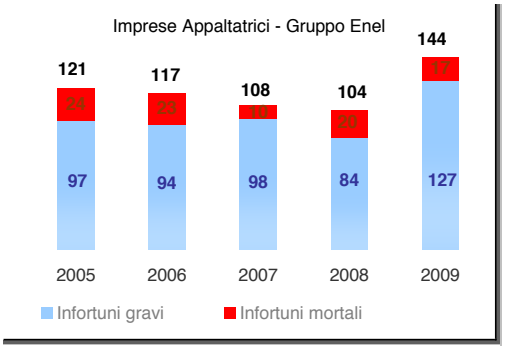


Fig. 4 – Infortuni gravi e mortali Imprese appaltatrici

I dati per la Divisione Generazione ed Energy Management di Enel - Divisione GEM3 [2] - sono di seguito indicati:

- numero totale infortuni dipendenti Divisione GEM - fig. 5.
- andamento indici infortunistici, indice di frequenza e indice di gravità – Fig. 6.

Nel periodo 2005 – 2009 gli infortuni complessivi per la **Divisione GEM** sono diminuiti del 79%. Da 91 eventi nel 2005 sono passati a 19 nel 2009 fig. 5. In questo numero sono compresi gli infor-

tuni gravi che al 2009 risultano 2. Analogamente l'indice di frequenza è passato da 5,5 nel 2005 a 1,66 nel 2009 con una riduzione del 69%. Gli infortuni si sono ridotti anche in termini di gravità. L'indice di gravità per la Divisione GEM nel periodo 2005 – 2009 si è ridotto del 47% fig. 6.

Per quanto riguarda i lavoratori delle imprese appaltatrici impegnate in lavori per la Divisione GEM, il numero di infortuni dopo un incremento nel biennio 2006 – 2007, risulta in calo. Nel 2009 si sono registrati 35 casi, di cui 1 grave e nessun infortunio mortale – fig 7a, fig. 7b.

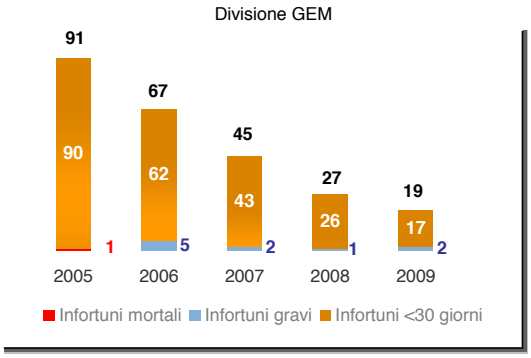


Fig. 5 – Infortuni occorsi ai dipendenti GEM

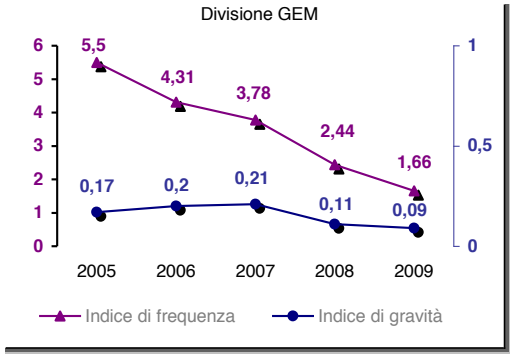


Fig. 6 – Andamento degli indici di frequenza e gravità

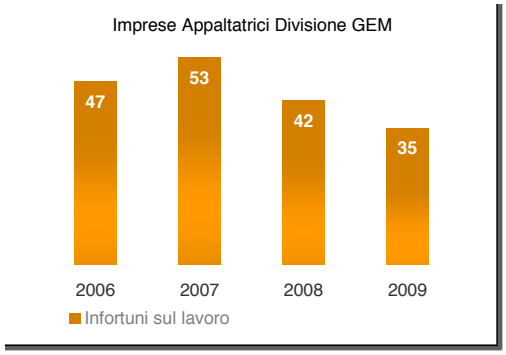


Fig. 7a - Infortuni Imprese Appaltatrici Divisione GEM

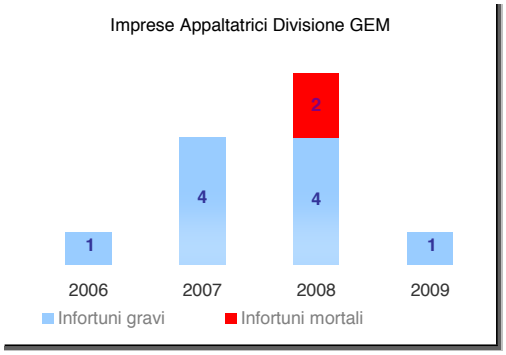


Fig. 7b - Infortuni gravi e mortali Imprese Appaltatrici Divisione GEM

A fronte di queste performance degli appaltatori non in linea con i risultati ottenuti da Enel negli anni precedenti, oltre alle iniziative già poste in campo (vendor rating, informazione ecc) Enel ha intrapreso un importante piano di azione teso a ridurre gli infortuni ponendo una forte attenzione sulla qualità delle imprese considerando gli aspetti della sicurezza prioritari in ogni elemento dell' appalto: dalla qualificazione alle risultanze finali, potenziando e rendendo più efficace il processo di gestione, verifica e controllo dell'operato dell'imprese.

3. LA SICUREZZA IN ENEL E IL MIGLIORAMENTO CONTINUO

Come azione correttiva e nell'intento di rafforzare il proprio impegno verso il più generale perseguimento dell'obiettivo "zero infortuni", nel corso degli ultimi anni il coinvolgimento dell'Azienda è stato globale, includendo sia i Vertici aziendali, coinvolti in prima persona, sia il personale tutto con un impegno reale e concreto che e si è sviluppato attraverso diverse attività tra cui il lancio ufficiale del nuovo Piano di miglioramento della gestione della sicurezza declinato

in 9 punti, "**Integrated Nine Point Safety Improvement plan**", ognuno dei quali sponsorizzato da un top manager di Enel, che definisce le linee guida del piano di azione che la nostra azienda sta implementando per migliorare gli standard della sicurezza sul lavoro nei vari livelli: operativi, gestionali contrattuali e soprattutto culturali.

1. Promozione della cultura della sicurezza,
2. la sicurezza degli appaltatori,
3. comunicazione efficace,
4. reazione tempestiva agli eventi,
5. formazione e informazione,
6. pianificazione e chiarezza degli obiettivi,
7. prevenzione strutturale dei luoghi di lavoro,
8. organizzazione della sicurezza
9. condivisione degli obiettivi.

Queste sono le 9 aree di intervento che rappresentano il punto di riferimento per una gestione preventiva e sistematica dei fattori di rischio, per il potenziamento della gestione della sicurezza nelle attività e nei servizi conferiti in appalto, per il raggiungimento dell'obiettivo comune di miglioramento continuo del livello di sicurezza e salute sui luoghi di lavoro.

Un piano che costituisce il "manifesto" della politica di safety dell'azienda e che si applica in tutti i luoghi di lavoro dove opera il personale del gruppo Enel pur tenendo conto delle diversità culturali, sociali ed economiche tra le specifiche realtà territoriali. In tale piano una particolare evidenza è rappresentata dalla modifica di strategie che definiscono i ruoli e i profili di leadership e l'inserimento della sicurezza come elemento imprescindibile nei vari luoghi dell'organizzazione.

3.1. La sicurezza degli appaltatori

Nella gestione dei rapporti con le imprese appaltatrici di lavori, servizi o forniture, Enel si è impegnata a una particolare attenzione agli aspetti di salute, sicurezza e gestione ambientale.

A seguito dell'entrata in vigore del D.Lgs. 81/2008 "Testo unico in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro", in conformità con quanto introdotto dall'art. 26 e art. 27, Enel, in modo particolare la Divisione GEM, sta rivedendo il sistema di qualificazione delle imprese.

Ogni appaltatore deve essere competente ed in grado di fornire garanzie adeguate in tema di sicurezza. Oggi l'appaltatore deve lavorare come un lavoratore alla pari di Enel.

Le imprese terze selezionate per svolgere il ruolo di affidatarie in appalto di prestazioni alla committente Enel sono preventivamente qualificate nel rispetto degli adempimenti di legge (art.26, D.Lgs. 81/2008) ed in seguito ad un'attenta valutazione dei requisiti tecnici e di sicurezza che le imprese dimostrano fornendo la documentazione richiesta.

Ad ogni impresa, in fase di qualificazione, viene applicato un comparto merceologico per specifico settore di attività, nel quale sono indicati i requisiti tecnici e di sicurezza richiesti, quali ad esempio l'esistenza e l'eventuale trasmissione ad Enel di procedure e/o istruzioni di lavoro in materia di Salute e Sicurezza e prevenzione ambientale, di analisi degli infortuni e mancati infortuni, di organigrammi con indicazione della struttura e dei referenti per la gestione della sicurezza.

La Divisione GEM ha recentemente implementato un sistema analitico basato su degli indici (Indice di **performance e Indice di qualità**) che consentono un'ulteriore valutazione dell'affidabilità e della qualità in tema di Safety delle imprese appaltatrici. Assegnato un valore agli indici in base a valutazioni legate alla documentazione fornita che tiene conto sia dell'andamento infortunistico dell'impresa appaltatrice (Tasso assicurativo INAIL) che degli investimenti in materia di Salute e sicurezza profusi (spese per formazione, acquisto DPI, studi e ricerche, ecc), in caso di anomalie evidenziate ulteriori approfondimenti vengono posti in campo con eventuale richiesta di azioni correttive e di miglioramento rispetto alle anomalie riscontrate.

Un volta assegnato il contratto, prima dell'inizio dei lavori e allo scopo di produrre un adeguato livello di cooperazione e soprattutto di coordinamento tra la committente e le imprese

appaltatrici viene richiesta ulteriore documentazione (informazione sui rischi indotti dalle attività, tempistica di intervento di ogni imprese nelle aree, misure di prevenzione e protezione, ecc).

Altro evento di rilievo è stata, in seguito alla prima edizione lanciata nel corso del 2008, la seconda **"Settimana internazionale della Sicurezza" (ISW)** che si è svolta dal 30 novembre al 05 dicembre 2009. Sette giorni intensi con la partecipazione attiva delle imprese appaltatrici, dedicati alla sicurezza di tutti e rivolti a valorizzare e diffondere le esperienze positive per un effettivo e costante miglioramento della safety nei luoghi di lavoro. Sono stati realizzati in tutto il mondo **994** eventi, con una partecipazione di quasi **70.000** unità di personale. Ben **23 i paesi coinvolti** e per la prima volta **Endesa** ha partecipato **con 199** iniziative al programma. La campagna è stata inoltre declinata in 10 lingue, a sostegno dell'internazionalizzazione di Enel.

Iniziativa dal forte significato simbolico con l'intento di accrescere il livello di consapevolezza e responsabilizzazione di tutti sul principio ***"everyone for safety"***.



Fig. 8a – 2^ International Safety Week



Fig. 8b – Workshop Ditte

Molteplici sono le attività affinché il personale che lavora in Enel e per Enel adotti comportamenti sicuri per se e per gli altri: attività formative/informative e di sensibilizzazione effettuate utilizzando la comunicazione (manifesti, adesivi, manuali, pocket book, video) come leva fondamentale per la costruzione di una cultura diffusa e profonda della sicurezza sono assiduamente perseguite. Attività come il ***Safety "24/7 Multilingua"*** – fig. 9a, il ***"Safety pocket book"*** - fig. 9b, , ***"Safety day"***, ***"Safety line"***, ***"Safety together"***, lanciati nell'ambito della Divisione GEM, sensibilizzano il lavoratore sulla sicurezza propria e altrui ponendo l'attenzione sulle persone, sulle azioni ma anche sui modi di pensare e agire, sulla necessità di adottare in ogni momento comportamenti sicuri per sé stesso e per gli altri.



Fig. 9a – Safety 24/7 Multilingua



Fig. 9b – Safety Pocket book

Tali progetti sono alla base dei processi di accoglienza alle imprese all'interno delle Unità di Business della Divisione GEM. In questa fase allo scopo di informare direttamente il personale delle imprese chiamate ad operare negli impianti, prima che le attività abbiano inizio, viene svolta un'adeguata azione informativa sui rischi presenti, sull'organizzazione delle emergenze, sulle norme comportamentali in materia di igiene, sicurezza sul lavoro e gestione ambientale. Il rilascio del permesso di ingresso al personale delle ditte terze risulta subordinato all'effettuazione del corso ed al superamento di una verifica nominativa di apprendimento (Esempio test di verifica - fig. 10a – 10b).



Fig. 10a –Test di verifica



Fig. 10b –Test di verifica

Durante lo svolgimento delle attività, la verifica dell'esecuzione in sicurezza dei lavori da parte del personale delle imprese, in conformità ai disposti di legge e nel rispetto delle procedure e istruzioni di lavoro Enel, è operazione congiunta delle funzioni che si occupano di sicurezza (Servizio di Prevenzione e Protezione) e di quelle operative che si occupano del monitoraggio dei lavori o della sovraintendenza degli appaltatori esterni (quali i preposti alle manutenzioni, i preposti di reparto).

Clausole specifiche inserite nei contratti di appalto, infine, prevedono la possibilità di irrogare penali e/o richiedere l'adozione di misure sanzionatorie nei confronti del personale dell'appaltatore che disattenda prescrizioni Enel sulla sicurezza e disposizioni di legge. Prevista anche la facoltà per i casi più gravi di recesso del contratto da parte del committente.

3.2. Azione di Maggior Supporto Divisione GEM

Verifica, controlli, formazione in campo, sensibilizzazione e promozione della cultura della sicurezza è quanto la Divisione GEM si impegna a realizzare con l'iniziativa denominata "Azione di Maggior Supporto". Il progetto lanciato nel corso del 2009 prevede la creazione di un gruppo di maggior supporto composto da tecnici Enel esperti di sicurezza e di manutenzione che operano supportando il personale di centrale, in occasione di eventi relativi a grandi modifiche e/o manutenzioni straordinarie affidate con il contributo di imprese appaltatrici ove numerose e complesse risultano le criticità di natura logistico – organizzativo e gestionale – programmatiche riguardanti la sicurezza.

Iniziativa che coinvolge apertamente i lavoratori delle imprese appaltatrici che nasce da una profonda analisi degli infortuni e delle cause che hanno portato agli infortuni: nel biennio 2007 – 2008 dei 69 infortuni occorsi alle imprese appaltatrici nelle unità produttive termoelettriche della Divisione GEM il 35% dei casi (24 eventi di cui 7 gravi e 2 mortali) si è verificato durante le attività di manutenzione/ revisione di impianto – fig. 11.

Incremento del personale esterno, situazioni di rischio nuove e diverse, attività svolte in condizioni spazio temporali ristrette, rischi interferenziali sono alcuni degli elementi di criticità

che insorgono durante l'esecuzione di dette attività. Per prevenire o ridurre la significatività di questi elementi Enel ha implementato un sistema di gestione della sicurezza che coinvolge sia il committente sia gli appaltatori nelle diverse fasi di realizzazione dell'appalto ed in cui le attività di progettazione, esecuzione e controllo dei lavori nel rispetto di procedure di sicurezza coordinate e condivise costituiscono elementi di prevenzione e riduzione dei rischi.

Stante le suddette finalità il gruppo controllerà tutte le aree di lavoro, interverrà immediatamente sul personale delle imprese appaltatrici in tutti i casi di pericolo grave e imminente (pericolo di caduta oggetti, mancato o errato utilizzo dei dispositivi di protezione, mancata protezione di cavi elettrici, ecc.) e segnalerà all'assistente tecnico tutti gli altri casi di violazione delle norme di sicurezza.

Nei casi di violazione è prevista la sospensione dei lavori sino al rispristino delle condizioni di sicurezza da parte dell'impresa appaltatrice, che sarà sottoposta alle azioni di recupero e sanzioni previste dal contratto.

Gli elementi di analisi ed osservazione rilevati dal gruppo in specifici report – fig. 12 - risultano utili e di supporto per la valutazione delle performance in tema di Safety delle imprese appaltatrici (Vendor Rating) che potrà a sua volta incidere sulla qualificazione futura.

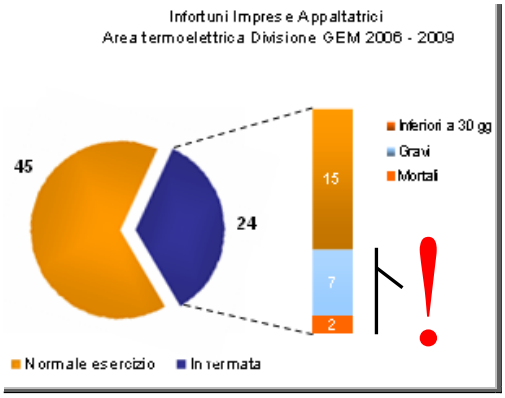
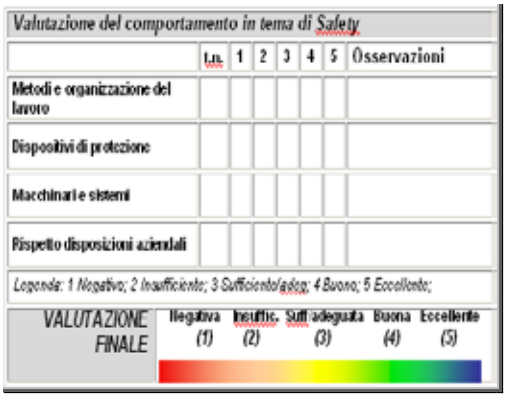


Fig. 11 – Dettaglio infortuni Imprese Appaltatrici Fig. Divisione GEM



12 – Report settimanale Impresa

"***Azione di Maggior Supporto***" prevede anche la possibilità, in presenza di cantieri di elevata complessità e di servizio già attivo in centrale, di estendere il presidio di pronto soccorso anche alle imprese affidatarie dei lavori in appalto.

Estremamente positivi i risultati della prima fase di applicazione del progetto – fig 13. Dal giugno 2009 ad4 oggi[2], con oltre **300.000 ore lavorate** e **6400 controlli** effettuati su un totale di **155 imprese osservate** con un picco di circa **2000 lavoratori esterni** durante attività di manutenzione programmata relative a 7 **impianti termoelettrici** della Divisione GEM presenti in Italia, si sono registrati solo due eventi infortunistici ambedue con prognosi inferiore a 30 giorni (7 giorni).

In figura 14 sono evidenziate le anomalie ed inadempienze maggiormente riscontrate nel corso delle verifiche sul comportamento in tema di safety delle imprese appaltatrici. I principali temi di contestazione riguardano il mancato uso dei DPI, ingombro delle vie di fuga ed inadeguatezza nella pulizia e segregazione delle aree consegnate, un uso improprio delle apparecchiature di lavoro.

Occorre infine sottolineare che il progetto rimarca la visione di Enel e il suo impegno costante nel consolidare i risultati acquisiti nel tempo affrontati da sempre nell'ottica del miglioramento continuo della sicurezza e della protezione della salute del proprio personale e di quanti operano presso le proprie strutture: imprese, collaboratori e terzi, visitatori inclusi.

307.839	*Ore lavorate*
1931	*Lavoratori delle imprese*
155	*Imprese osservate*
372	*Report settimanali di valutazione del comportamento in tema di Safety*
6436	*Controlli*
1294	*Contestazioni*
13	*Interruzioni Attività*
807	*Correzioni Immediate*
474	*Azioni Correttive*

Fig. 13 – I numeri del Maggior Supporto

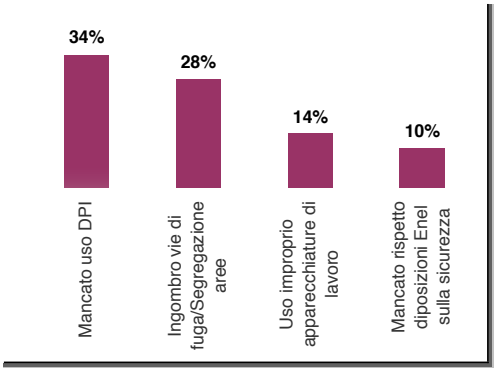


Fig. 14 – Tipologia inadempienze

3.3. Il Vendor Rating in Enel

Enel ha approntato per i fornitori e appaltatori con cui ha rapporti contrattuali un sistema di **Vendor Rating**. Si tratta di un sistema finalizzato alla valutazione e al monitoraggio delle performance relative alle prestazioni ricevute dai propri fornitori ed appaltatori nonché della affidabilità dei prodotti acquistati. Una rilevazione obiettiva e sistematica di informazioni relative sia ai comportamenti tenuti dalle Società durante l'espletamento dell'iter di approvvigionamento, sia agli aspetti di puntualità, correttezza e sicurezza delle prestazioni eseguite nonché di difettosità / non conformità dei beni forniti.

Il processo di valutazione dell'appaltatore/fornitore porta all'assegnazione a ciascun fornitore qualificato di un **Indice di Vendor Rating** complessivo **(IVR)** risultante da quattro indici parziali relativi alle categorie fondamentali (*Puntualità, Qualità, Correttezza e Sicurezza* durante l'espletamento dell'iter di approvvigionamento), di valore compreso tra 0 e 100.

L'**Indice di Vendor Rating** ottenuto a valle delle rilevazioni sopra indicate, viene utilizzato da Enel per la formulazione di una valutazione complessiva di ciascun fornitore, in relazione alle diverse tipologie di prestazioni e/o di beni forniti, che consentirà di ottenere un quadro di riferimento utile per le future strategie di acquisto o per interventi sugli stessi fornitori nell'ottica di incrementare e rendere più sicuro il loro livello di servizio, professionalità e qualità.

Una prima applicazione del sistema ha evidenziato per le imprese, in relazione proprio alle tematiche di sicurezza, alcune aree di miglioramento consentendo di accrescere la sensibilità dei fornitori sul tema e perseguire con **Enel** l'obiettivo **"zero infortuni"**.

NOTE

(1) Procedura Operativa 130 del 5 giugno 2009: "Informativa ed analisi in caso di infortunio"

[1] Dati forniti da CPO/Safety di Enel. NB i dati nell'ultimo biennio sono influenzati dalla notevole variazione del perimetro di pertinenza del Gruppo (Countries Estere).

[2] Divisione del Gruppo a cui sono attribuite attività di produzione, acquisto e vendita di energia elettrica, sourcing di combustibili.

(2) Dati al 15 marzo 2010.

sessione PLENARIA

Contributo del CTI all'aggiornamento delle norme italiane ed europee nell'ambito degli impianti a pressione e relativa organizzazione

*M. Cannerozzi de Grazia**
*G. Riva***
*G. Pinna****

**Presidente del Sottocomitato 3 del CTI "Generatori di calore e Impianti in pressione"*
***Professore ordinario presso l'Università Politecnica delle Marche, Direttore Generale del CTI*
****Consulente CTI e referente per il Sottocomitato 3 del CTI.*

1. PREMESSE

Il CTI, Comitato Termotecnico Italiano, è un Ente fondato nel 1933 e federato all'UNI, delegato per sviluppare la normativa di seguito descritta e di rappresentare l'Italia - mediante i propri iscritti - nei Comitati Tecnici europei (CEN) ed internazionali (ISO) che si occupano di materie tecniche di competenza che spaziano nel vasto settore della termotecnica.

Il CTI è una Associazione senza scopo di lucro (circa 500 soci) che si occupa di Normazione della produzione e utilizzazione di energia termica in generale, incluse le relative implicazioni ambientali e di sicurezza, ed in particolare, tramite il proprio Sottocomitato 3 (SC3), elabora la normazione di costruzione ed utilizzazione di generatori di calore ed attrezzature a pressione.

Il CTI effettua anche attività di Ricerca e di collaborazione con Ministeri, Regioni, Università e con le istituzioni interessate a sviluppare temi legati alla normativa tecnica.

Il CTI svolge quindi attività di *Normazione, Informazione e Formazione* nell'ambito delle materie di propria competenza, su necessità e su richiesta dei propri soci.

L'attività di *Normazione* viene espletata mediante Gruppi di Lavoro (oggi una sessantina raggruppati in 10 Sottocomitati) su tematiche specifiche, aperti a tutti i soci del CTI che volessero parteciparvi (funzionari ministeriali, ricercatori universitari, tecnici di ditte costruttrici e/o utilizzatrici di attrezzature a pressione, Enti di prevenzione infortuni e di sicurezza sul lavoro, funzionari UNI, Organismi Notificati per attrezzature a pressione, ecc.).

L'attività di *Informazione* viene espletata mediante Seminari tecnici di divulgazione, mediante pubblicazioni tecniche di vario tipo e mediante un sito web CTI accessibile www.cti2000.it .

L'attività di *Formazione* viene espletata mediante specifici Corsi di formazione su argomenti tecnici attuali ed innovativi organizzati direttamente dal CTI.

2. ATTIVITÀ NORMATIVA

L'attività di normativa si svolge basandosi sui seguenti principi da cui non si deroga mai:

- Consensualità, mediante la partecipazione e la approvazione di ciò che viene elaborato da parte di tutti i soci interessati e partecipanti ai Gruppi di Lavoro.
- Democraticità, mediante la richiesta di partecipazione ai particolari lavori tecnici, da parte della Direzione CTI, a tutti i Soggetti interessati a livello nazionale.
- Trasparenza, mediante inchiesta pubblica, tramite UNI, di tutte le norme che vengono inviate all'UNI dopo la approvazione finale del Gruppo di Lavoro del CTI.

Oltre alle ditte e organizzazioni interessate direttamente ai vari argomenti, viene richiesta la partecipazione ai Gruppi di lavoro anche di esperti universitari, di ispettori che in seguito dovranno far applicare e rispettare la norma, di funzionari ministeriali per assicurare la congruenza delle norme sviluppate con delle direttive tecniche nazionali e internazionali.

3. STRUTTURA DEL CTI ED IN PARTICOLARE DEL SOTTOCOMITATO 3

Il CTI è strutturato in dieci Sottocomitati, ciascuno con il suo settore di competenza, e precisamente([1]):

SC 1 - Trasmissione del calore e fluidodinamica
SC 2 - Fonti convenzionali di energia e processi di conversione
SC 3 - Generatori di calore e impianti in pressione
SC 4 - Turbomacchine e macchine volumetriche
SC 5 - Condizionamento dell'aria e refrigerazione
SC 6 - Riscaldamento e ventilazione
SC 7 - Impianti termoelettrici e tecnologie di sicurezza
SC 8 - Misure e strumentazione
SC 9 - Fonti rinnovabili di energia
SC10 - Termoenergetica ambientale e sostenibilità

Tutti i Sottocomitati rispondono per le tematiche tecniche direttamente alla Presidenza del CTI([2]), che li coordina e ne valuta i risultati. In particolare il SC3 del CTI "Generatori di calore ed impianti a pressione" è così costituito([3]):

GL 303 -Progettazione e costruzione di attrezzature a pressione e di forni industriali
- SG1 - Recipienti a pressione non esposti a fiamma (CEN TC 54; ISO TC 11)
- SG2 - Caldaie a tubi d'acqua e da fumo (CEN TC 269; ISO TC 11)
- SG3 - Forni chimici, petrolchimici, per oli minerali e altri forni industriali (CEN TC 186; ISO TC 244)

GL 304 - Integrità strutturale apparecchi a pressione
- SG1 - Scorrimento Viscoso (CREEP)
- SG2 - Fitness for Service (FFS)([4])
- SG3 - Risk-based Inspection (RBI)([5])

GL 305 - Esercizio e protezione apparecchi a pressione
- SG1 - Dispositivi di protezione contro le sovrappressioni (ISO TC 185)
- SGA - Condotta generatori vapore([6])
- SGB - Esercizio attrezzature pressione([7])

4. ATTIVITÀ SVOLTA DAI GL DEL SC3 NEL 2009 E PROGRAMMA 2010 (CON ESCLUSIONE DEI LAVORI SUL DM 329/2004)

A seguito della riorganizzazione del SC3 definita nel mese di settembre il GL 303 include ora i SG 01, 02 e 03 che in precedenza erano rispettivamente di competenza dei GL 301, 302 e 306+204.

Il GL 303 SG1 "Recipienti a pressione non sottoposti a fiamma" ha proseguito l'esame delle norme armonizzate EN 13445 prodotte dai WG del CEN/TC54. Il gruppo ha continuato, in collaborazione con UCC, nella gestione della segreteria del WG C "Progettazione" del CEN/TC54 fino al completamento dei Work Item approvati, per la revisione/integrazione delle norme EN 13445 Parte 3 "Progettazione".

Il GL 303 SG2 "Caldaie a tubi d'acqua e da fumo" ha partecipato attivamente all'elaborazione di proposte per la modifica delle parti delle norme armonizzate EN 12952 (parti 2, 3, 4, 5 e 6) ed EN 12953 (parti 1, 2, 3 e 13), che sono sottoposte a revisione, anche alla luce delle esigenze dei costruttori/utenti italiani e anche direttamente attraverso la partecipazione ai tre Working Group: 1 Water-tube boilers; 2 Shell boilers; 3 Equipment; e al Maintenance Help Desk (MHD) del CEN TC 269.

Per il GL 303 SG3 “Forni chimici, petrolchimici, per oli minerali e altri forni industriali” è stata avviata la definizione del programma di lavoro. In particolare si intende promuovere, congiuntamente a UNI, la trasposizione della Raccomandazione CTI R6:2006 Ed. Dic. 2007 “La progettazione, la costruzione e l’esercizio di forni chimici e petrolchimici” in una norma a valenza europea sull’argomento in oggetto.

Per il GL 304 “Integrità strutturale degli apparecchi a pressione” è in fase di pubblicazione da parte dell’UNI il documento sviluppato dal SG1 “Scorrimento viscoso”, originato dalla trasformazione in norma UNI della Raccomandazione CTI R5:2005 “La valutazione della vita residua di componenti in regime di scorrimento viscoso”, da utilizzarsi come documento tecnico di supporto alla specifica tecnica “Verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale” (applicativa dell’art. 12 D.M. n. 329/2004), anch’essa in fase di pubblicazione.

Sempre per il GL 304 sono stati avviati i lavori del SG 2 “Fitness For Service” che si occupa di elaborare una specifica tecnica basata sui principi della *Fitness For Service* Assessment, la quale ha come oggetto la valutazione dei difetti degli impianti e delle macchine, nati sia in fase di costruzione che durante la loro vita operativa, allo scopo di determinarne la criticità e la possibilità di ulteriore esercizio dei componenti in loro presenza.

Il SG 3 “Risk Based Inspection” del GL 304 è entrato in fase di sviluppo con l’elaborazione della specifica tecnica “Pianificazione delle ispezioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI)”, che introduce la metodologia RBI ai fini del controllo di integrità strutturale delle apparecchiature e degli insiemi a pressione Questa metodologia consiste nel programmare i controlli di integrità assegnando le priorità in base alla valutazione dei rischi connessi al singolo componente d’impianto, a differenza dei sistemi tradizionali in cui i controlli vengono programmati su base periodica regolare, in funzione delle caratteristiche progettuali dell’apparecchio e delle sue condizioni di esercizio.

Il GL 305 “Esercizio e protezione degli impianti a pressione”, con il SG A e il SG B, è impegnato nello sviluppo delle specifiche tecniche per l’attuazione dell’art. 3 del DM 329/2004.

Il SG 1 “Dispositivi di protezione e controllo degli impianti a pressione” (gruppo misto CTI-UNI) ha attivamente contribuito, con proposte di modifiche e integrazioni, all’elaborazione delle diverse parti delle norme ISO 4126, prodotte dall’ISO/TC185 e relative ai dispositivi di sicurezza contro le sovrappressioni (in particolare parti 1, 4, 5, 6 e 7).

Il gruppo ha avviato la stesura della nuova parte di norma ISO 4126-11 “Perfomance testing”, con la preparazione di un primo Working Draft. Lo sviluppo della norma sarà portato avanti dal gruppo nel corso del 2010.

Proseguirà inoltre coordinamento, congiuntamente alla Commissione Valvole UNI, della partecipazione italiana al CEN/TC69 WG 10, responsabile in Europa per il recepimento delle norme ISO 4126.

Il gruppo infine ha in programma la prosecuzione dell’elaborazione della bozza di specifica tecnica “Manutenzione dei dispositivi per la limitazione diretta della pressione (valvole di sicurezza)”.

In ambito SC3 è inoltre previsto anche l’avvio di attività sui seguenti temi:

- Argomenti relativi a Normative rientranti in Direttive europee di prodotto.
- Attrezzature e collegamenti particolari rientranti nella Direttiva PED (forni per servizi di raffineria, recipienti in ghisa lamellare, camere iperbariche ecc.).
- Spie visive per apparecchi a pressione circolari e non, di vetro, di materiale PMMA.

Argomenti relativi a Normative non rientranti nell’ambito di Direttive europee di prodotto

- Regolamentazione dei locali per caldaie (centrali termiche).
- Recipienti di grande capacità con pressione non superiore a 0,5 bar.
- Dispositivi di sicurezza per attrezzature non PED o in art. 3 par. 3 della PED.

Altre richieste inoltrate di argomenti in aggiunta a quelli proposti:

- Dispositivi particolari di sicurezza (indicatori di livello, valvole per fluidi in condizioni critiche, fluidi bifasici, valvole di scarico termico, ecc.).
- Impianti di riscaldamento ad acqua calda rientranti in art. 3 par. 3 della PED.

- Riparazioni temporanee su impianti a ciclo continuo o per i quali una fermata non programmata può provocare danni a persone, animali e cose.
- Riparazioni di attrezzature particolari per un loro riutilizzo senza necessità di una riqualificazione secondo PED (es.: serbatoi per GPL, generatori di vapore complessi, ecc.).
- Criteri tecnici aggiornati di verifiche periodiche e decennali per GPL interrati.
- Sorveglianza di generatori di vapore di limitata potenzialità, a bassa pressione, con sorgente termica diversa dal fuoco, ecc.

In aggiunta, a seguito di una riunione tenutasi a marzo 2009 presso il Ministero dello Sviluppo Economico, il CTI sta seguendo le attività svolte da UNI per l'aggiornamento della normativa tecnica in ambito nucleare, in accordo alle prospettive di rilancio della filiera di settore prospettato dal Governo. A tale scopo UNI ha creato dei gruppi di lavoro finalizzati all'aggiornamento e allo sviluppo della normativa pertinente. Tra i gruppi di interesse CTI va ricordato quello operante su "*Tecnologia dei componenti meccanici*" che include il tema dei "*recipienti a pressione*". L'aggiornamento della normativa del settore nucleare, tuttavia, ha evidenziato un quadro documentale sostanzialmente congelato dagli anni '70 e che quindi deve opportunamente collegarsi con la normativa dei Paesi che hanno continuato lo sviluppo tecnologico in questo particolare settore.

5. LAVORI DI ATTUAZIONE DELL'ART. 3 DEL DM 329/2004

Il D.M. 329/2004 relativo alla utilizzazione ed esercizio degli apparecchi a pressione in Italia prevede all'art. 3 che - da parte dei Ministeri vigilanti - vengano emanate delle Specifiche tecniche di attuazione. I Ministeri vigilanti si sono quindi rivolti ad UNI che a sua volta ha delegato il CTI, attraverso il suo SC3, a conseguire gli obiettivi necessari.

In aggiunta, nell'ambito del CTI è stata creato un "Comitato di Coordinamento" (CdC) che raggruppa tutte le organizzazioni interessate al DM 329/2004 al fine di meglio indirizzare i lavori del SC3 del CTI. I documenti del CdC, che si riunisce periodicamente, sono raccolti in una apposita sezione del sito del CTI.

Gli argomenti che sono stati ritenuti meritevoli di apposite Specifiche Tecniche sono riassunti nel prospetto che segue che riporta anche l'attuale (febbraio 2010) stato di avanzamento e il programma di attuazione.

Le specifiche tecniche saranno articolate nella serie UNI/TS 11325, "Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione", parti da 1 a 10.

N.	Titolo	Stato dell'arte	GL Previsione termine lavori
1	**Parte 1**: Valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica d'integrità	Norma pubblicata	GL CTI: 305 SG D Coord.: Ing. Saluta
2	**Parte 2**: Verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale	Bozza licenziata dal GL. In fase di presentazione alla DT UNI per la revisione e inchiesta pubblica	GL CTI: 304 SG1 Coord.: Ing. Delle Site Termine: aprile 2010
3	**Parte 3**: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata	Bozza sottoposta a inchiesta pubblica UNI In fase di elaborazione di ulteriori commenti pervenuti da MSE.	GL CTI: 305 SG A Coord.: Ing. Rondinella Termine: marzo 2010.
4	**Parte 4**: Metodi di valutazione di integrità di attrezzature a pressione esercite in regime tale per cui possono essere significativi fenomeni di scorrimento viscoso	Bozza licenziata dal GL. Presentata alla DT UNI per la revisione e inchiesta pubblica Sarà pubblicata come norma	GL CTI: 304 SG 1 Coord.: Ing. Delle Site Termine: aprile 2010.

N.	Titolo	Stato dell'arte	GL Previsione termine lavori
5	**Parte 5**: Riparazioni e modifiche.	Bozza licenziata dal GL. In fase di presentazione alla DT UNI per la revisione e inchiesta pubblica	GL CTI: 305 SG B Coord.: Ing. Misiti Termine: giugno 2010.
6	**Parte 6**: Messa in servizio e verifiche periodiche	Testo in fase di elaborazione da parte del GL	GL CTI: 305 SG AB Coord.: Ing. Misiti Termine: agosto 2010.
7	**Parte 7**: Esclusioni	Bozza licenziata dal GL. In fase di presentazione alla DT UNI per la revisione e inchiesta pubblica Sarà pubblicata come RT	GL CTI: 305 SG B Coord.: Ing. Misiti Termine: marzo 2010.
8	**Parte 8**: Pianificazione delle ispezioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI)	Testo in fase di elaborazione da parte del GL	GL CTI: 304 SG 3 Coord.: Ing. Faragnoli Termine: novembre 2010.
9	**Parte 9**: Fitness for Service (FFS)	Testo in fase di elaborazione da parte del GL	GL CTI: 304 SG 2 Coord.: Ing. Sampietri Termine: novembre 2010.
10	**Parte 10**: Manuale per la gestione dell'esercizio degli impianti in pressione	Lavori sospesi. Sarà analizzata la fattibilità dopo il completamento delle parti 5 e 6.	-

Tabella 1
Stato dell'arte dei lavori sulle Specifiche Tecniche relative al DM 329 del 2004 (agg. febbraio 2010)

6. NOTE CONCLUSIVE

Il CTI costituisce la naturale interfaccia dell'industria e delle organizzazioni interessate allo sviluppo della normativa del settore termotecnico. Attraverso il CTI i singoli soggetti possono partecipare ai tavoli che preparano testi di fondamentale importanza per lo sviluppo tecnologico e la e la regolamentazione dell'utilizzo di prodotti e tecnologie.

Su questi tavoli si plasma quindi un importante fattore economico ma non solo. Chi partecipa ha l'opportunità di sviluppare relazioni interpersonali di livello (sia nazionali che internazionali) e ha l'opportunità per un continuo aggiornamento professionale.

Il CTI crede che questi aspetti siano da coltivare nell'interesse di tutti e che costituiscano una valido investimento per il futuro, anche se oggi molteplici segnali sembrerebbero consigliare un disimpegno da tutte le attività apparentemente poco proficue e non legate a una precisa committenza di breve periodo, alimentando così una pericolosissima desertificazione culturale e, in ultima analisi, economica.

7. RIFERIMENTI

Tutte le informazioni sul CTI e le sue attività sono reperibili sul sito *www.cti2000.it*

In particolare per il SC3 i documenti programmatici sono disponibili all'indirizzo: *http://www.cti2000.it/index.php?controller=documenti&action=documentiPrivati&id=23*

Si accede alle attività dei vari Gruppi di Lavoro all'indirizzo: *http://www.cti2000.it/index.php?controller=sezioni&action=attnorm#SC03 - GENERATORI DI CALORE E IMPIANTI IN PRESSIONE*

I resoconti del Comitato di Coordinamento dei lavori sul DM 329/2004 sono disponibili all'indirizzo: *http://www.cti2000.it/dm329.php*

NOTE

(1) L'attuale denominazione dei Sottocomitati è in fase di revisione e potrà subire delle variazioni dopo il mese di Aprile 2010.

(2) La Presidenza si avvale della Direzione, del Comitato di Presidenza e della Commissione Tecnica. Maggiori informazioni sono disponibili sui documenti istituzionali disponibili sul sito www.cti2000.it.

(3) Con GL si indica "Gruppo di Lavoro", con SC "Sottogruppo di lavoro". Ogni GL dispone di una propria scheda interattiva sul sito internet del CTI che contiene tutta la documentazione di competenza e anche quella dei Technical Committee CEN e ISO interfacciati dal gruppo stesso (sezione "Normazione").

(4) Gruppo attivo per l'attuazione delle Specifiche tecniche dell'art. 3 del D.M. n. 329/2004

(5) Gruppo attivo per l'attuazione delle Specifiche tecniche dell'art. 3 del D.M. n. 329/2004

(6) Gruppo attivo per l'attuazione delle Specifiche tecniche dell'art. 3 del D.M. n. 329/2004

(7) Gruppo attivo per l'attuazione delle Specifiche tecniche dell'art. 3 del D.M. n. 329/2004.

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

Procedura approfondita di Valutazione Globale di Conformità degli insiemi: Orientamento e proposta di attuazione del Forum europeo degli O.N. (CABF/PED)

*M. Cannerozzi de Grazia**
**Presidente del Sottocomitato 3 del CTI*

1. SOMMARIO

La Relazione intende informare i convenuti al Convegno SAFAP sull'argomento in oggetto, cioè sulla preoccupazione dei Membri del Forum Europeo degli O.N. relativa alla effettiva applicazione delle procedure tecniche di valutazione di conformità per la costruzione ed immissione sul mercato europeo degli insiemi a pressione da parte degli Organismi Notificati europei.

Il Forum sta individuando e precisando i princìpi basilari da elencare in un documento-guida ("Guiding Principles"), ed in questa relazione verranno esplicitati tali princìpi già acquisiti per i seguenti argomenti relativi alla valutazione di conformità:

Obiettivi, Definizioni, Contenuti della Documentazione tecnica;

Esplicitazione della Valutazione globale di conformità:

Valutazione delle singole attrezzature (art. 10.2a)

Valutazione dell'integrazione delle attrezzature dell'insieme (art. 10.2b)

Valutazione della protezione dell'insieme (art. 0.2c)

Categoria e Moduli di Valutazione, Certificato di conformità

2. INTRODUZIONE

La Direttiva PED esige che un insieme sia valutato seguendo la procedura di Valutazione Globale di Conformità (VGC). La VGC però non è esposta nei dettagli nella PED.

Questo documento di indirizzo, in elaborazione presso il Forum Europeo degli Organismi Notificati (CABF), si ripropone di approfondire tecnicamente e più dettagliatamente i contenuti di una valutazione di conformità degli insiemi.

2.1. Obbiettivo

L'obbiettivo di questo documento pertanto consiste nel riempire di contenuti tecnici l'applicazione della procedura di VGC riportata nell'art. 10.2 della PED.

Ciò si concretizza nel suggerire indicazioni orientative di guida per le principali fasi della procedura, per giungere alla VGC di un insieme.

La applicazione di questo documento però è limitato ai soli Moduli di ispezione diretta (A1, B, B1, C1, F, G) e non ai Moduli di Qualità (D, E, H).

Inoltre vengono dati chiarimenti e indicazioni per alcune linee-guida WGP europee che necessitano di puntualizzazioni a riguardo.

Questo documento vuole essere inoltre un documento pubblico e accessibile a tutte le parti coinvolte e interessate.

2.2. Definizioni

L'art. 1 par. 2.1.5 definisce un insieme come un tutto integrato e funzionale. Questo paragrafo fornisce alcune precisazioni su questa definizione.

Poichè per un insieme non vi sono limiti nè inferiori nè superiori, esso può variare da un semplice estintore ad una completa raffineria. Non essendovi limiti, anche una VGC può variare da una semplice valutazione ad una valutazione molto complessa. È perciò augurabile che il fabbricante (in molti casi in stretta collaborazione con l'utente) determini il prima possibile i limiti dell'insieme.

Ciò è importante per poter definire concretamente lo scopo del lavoro di verifica dell'Organismo Notificato e anche per valutare attentamente i risvolti sulle ispezioni di esercizio dell'insieme così delineato anche secondo i regolamenti nazionali.

È noto che è del fabbricante la responsabilità della determinazione dei limiti di un insieme. È comunque consigliabile contenerlo in dimensioni piccole e pratiche. Per esempio un insieme grande e complesso può essere diviso in più piccoli sottoinsiemi valutati singolarmente e assemblati successivamente.

2.3. Documentazione

Il fabbricante deve predisporre (in funzione della procedura di valutazione di conformità) la seguente documentazione tecnica per la valutazione dell'insieme (la lista seguente non è esaustiva):

nella fase di valutazione del progetto:

- Una descrizione generale dell'insieme (che includa anche l'uso previsto e eventuali usi errati prevedibili).
- Lista delle attrezzature con tutte le informazioni tecniche rilevanti (PS, TS, fluido contenuto, categoria, ecc.).
- Le istruzioni per l'uso di ciascuna attrezzatura a pressione (ed in particolare le informazioni relative alla sicurezza, come ad esempio la pressione, la temperatura, i fluidi, i dispositivi di sicurezza, ecc.).
- La valutazione dei rischi dell'insieme (relativi ad esempio anche a: incendio, sistema di raffreddamento, mancanza di energia, ecc.).
- Informazioni relative ai dispositivi di protezione (es.: flow sheets, capacità delle valvole di sicurezza, massima portata del fluido).
- Il diagramma dei flussi di processo
- P&ID Flow-chart delle tubazioni e delle strumentazioni
- Normative utilizzate per la progettazione e la costruzione dell'integrazione delle attrezzature e dei sistemi di protezione.
- Esempio di possibili norme utilizzabili per determinati tipi di insiemi:
  > ANSI/API Standard 521 (of ISO 23251)
  > API Standard 520
  > EN ISO 4126-1/3/4/5
  > EN 764-7
  > ISO/IEC 61511-1/2/3
  > EN 12952-10
  > EN 12953-8
  > EN 378

è consigliabile sviluppare uno standard armonizzato per l'integrazione delle attrezzature e per i sistemi di protezione di altri tipi di insiemi,

nella fase di valutazione della costruzione o della valutazione finale:

- Dichiarazione di Conformità di tutte le attrezzature a pressione che formano l'insieme (e che sono state assoggettate ad una Valutazione di conformità).
- Dichiarazione di Conformità di qualunque altra attrezzatura che sia necessaria per la protezione dell'insieme, e che è assoggettata ad una Direttiva (es.: CSPRS, SRMCR).

- Documentazione finale di costruzione, che deve essere disponibile nella fase di ispezione/ valutazione.
- Dichiarazione di Conformità dell'insieme (bozza).
- Istruzioni per l'uso dell'insieme (bozza).

3. VALUTAZIONE GLOBALE DI CONFORMITÀ (VGC)

In una VGC tutti i Requisiti Essenziali di Sicurezza della PED applicabili (RES) devono essere presi in considerazione nella valutazione dei rischi di un insieme.

La VGC è costituita da tre fasi, come riportato nell'art. 10.2 (*a*, *b* e *c*):

3.1. Valutazione di ciascuna attrezzatura (art. 10.2.a)

Non vi è necessità (ed è anche proibito) di valutare di nuovo una attrezzatura che è già stata marcata CE, ma la documentazione appropriata (istruzioni per l'uso, Dichiarazione di conformità) deve essere disponibile. L'O.N. deve controllarne la Dichiarazione di Conformità ed identificare le attrezzature che non sono ancora state valutate secondo PED.

L'art. 15.3 stabilisce anche che non è necessaria la effettiva marcatura CE di ciascuna attrezzatura a pressione dell'insieme, ma la procedura di valutazione di conformità applicabile alla singola attrezzatura deve essere stata comunque espletata per ciascuna di esse.

3.2. Valutazione della integrazione dei componenti di un insieme (art. 10.2b)

Anche se l'articolo fa riferimento in particolare ai RES 2.3, 2.8 e 2.9 dell'Allegato I, il fabbricante deve prendere in considerazione tutti i RES applicabili (GL 3-12).

3.2.1. Progettazione

Gli elementi che devono essere valutati durante l'esame del progetto della integrazione sono (la lista non è esaustiva, e la valutazione dipende dal Modulo scelto):

Informazioni generali, lista delle attrezzature e delle linee, valutazione dei rischi, descrizione del processo, (dal punto di vista della sicurezza, per comprendere l'utilizzo dell'insieme), manuali per l'utilizzatore, ecc.. Per un esempio di liste vedere le Appendici 1 e 2.

Verifica in accordo al P&ID: nel P&ID devono essere riportati tutti i flussi di fluidi; da dove essi provengono (se il fluido viene da una pompa, da un recipiente, ecc.) e quale è la pressione di taratura dei dispositivi di sicurezza o la massima pressione di esercizio prevista dalla pompa.

Di ciascuna attrezzatura deve essere verificato se essa è idonea per l'uso previsto (PS, TS, fluido, vuoto, evaporazione calda o fredda, carichi sui bocchelli, vibrazioni,, fatica, ecc. ecc.).

Possibilità dei diversi fluidi di mischiarsi fra loro e possibili reazioni (RES 2.2.3).

Linee connesse ad una pompa, pressione, vibrazioni, fatica (RES 6.d).

Flessibilità delle tubazioni (RES 6.a) di II e III categoria (la flessibilità delle tubazioni deve essere stata considerata durante la valutazione di conformità delle tubazioni. Le forze sulle connessioni (carichi sui bocchelli) devono essere considerate durante la valutazione dell'insieme).

Carichi sui bocchelli (RES 2.2.1.+ 6d)

Carico idrostatico del liquido.

Tutti i possibili malfunzionamenti (relativi alla pressione) devono essere stati presi in considerazione; ogni singolo malfunzionamento non deve permettere il superamento dei limiti di progetto di alcuna attrezzatura.

Esempi sono:

> Malfunzionamento del sistema di raffreddamento
> Rottura di un tubo in uno scambiatore di calore,
> Chiusura o aperture di una o più valvole.
> Espansione termica del liquido,
> Mancanza improvvisa di energia, raffreddamento, utilities,
> Reazioni esotermiche,
> Fuoco,
> Prevedibili usi non appropriati,
> etc.

Un innalzamento di pressione fino al valore di taratura di un dispositivo di sicurezza è considerato come normale condizione operativa.

3.2.2. Ispezione

Gli elementi da controllare e valutare durante la fase di integrazione dell'insieme sono (la lista non è esaustiva):

- saldature / WQ / WPQR / NDT (WGP 3/15)
- carichi sui bocchelli, vibrazioni e fatica (RES 6d)
- misure per assicurare operazioni e movimentazione in sicurezza (RES 2.3)
- mezzi di indagine (RES 2.4)
- mezzi di drenaggio e di ventilazione (RES 2.5 + 6b)
- mezzi di riempimento e di scarico
- connessioni e supporti
- verifiche in accordo al P&ID (es. posizione delle valvole)
- verifiche delle misure in accordo al disegno "as built"
- prova di pressione dell'insieme (guideline 3-6) (vedere par. 8.2).

3.3. Valutazione della protezione dell'insieme (art. 10.2c).

Se, come risultato della valutazione dell'integrazione e/o dell'analisi dei rischi, un insieme deve essere equipaggiato con dispositivi di sicurezza, la valutazione della protezione dell'insieme deve contenere almeno i seguenti elementi (la lista non è esaustiva):

3.3.1. Progettazione

Gli elementi che devono essere valutati nella fase progettuale della protezione dell'insieme sono:

- Sistemi di allarme acustico
- Dispositivi di sicurezza: tipo (es.: bellow /foil), categoria, capacità, valori di taratura/attivazione (es.: pressione, temperatura)
- Segnali di input per valvole ESD
- Calcoli di capacità di Blow-off (liquido / gas ?)
- Linee di Blow-off dei dispositive di sicurezza.
  - > Capacità, dimensioni
  - > Contropressione (es.: dalla resistenza nella linea, dal sistema generale di perdite di carico (flare))
  - > Supporti della linea
  - > Ubicazione dei safe blow-off
- SRMCR, CSPRS, progettazione, classe SIL.

3.3.2. Ispezione

Elementi che devono essere considerati nella fase di ispezione:

- valori di attivazione, pressione, temperature, ecc.
  - > certificati di prova della pressione di apertura delle valvole di sicurezza (con data non anteriore di più di 12 mesi)
  - > prove di simulazione
  - > test finale in situ
  - > certificati di altri dispositivi (come dischi di rottura , ecc.)
- tipo di dispositivo di sicurezza (es.: materiale dei dischi di rottura, bellow in PSV)
- combinazione di dispositivi di sicurezza, come dischi di rottura con PSV (differenze di pressione fra Dischi di Rottura e PSV)
- linee Blow-off dei dispositivi di sicurezza:
  - > Dimensioni

> Supporti della linea
> Ubicazione dei blow-off di sicurezza

- Controllo della costruzione in accordo al progetto (P&ID)
- Ubicazione di altri dispositivi
- Controllo delle valvole ad apertura/chiusura bloccata, testaggio dei sistemi interlock (o sistemi simili)
- per i livelli di sicurezza vedere EN 764 part e7 par. 8.5
- Targa dati e marcatura CE dell'insieme.

4. CATEGORIA E MODULI

Il Modulo di Valutazione di Conformità dell'insieme integrato è determinato dalla più alta fra le categorie delle attrezzature dell'insieme (con esclusione dei dispositivi di sicurezza, Art. 10.2.b)

La categoria della valutazione della protezione è determinata dalla categoria della attrezzatura (insieme) protetta (Art. 10.2c).

È possibile rideterminare una categoria inferiore per una attrezzatura dell'insieme già marcata CE, in accordo alla linea-guida WGP 3-16.

Quest'ultima categoria può essere presa in considerazione per valutare la categoria dell'insieme e la relativa valutazione dell'integrazione e della protezione dell'insieme.

Vedere anche la nota della linea-guida WGP 3-16 relativa ad una attrezzatura marcata CE inserita in un insieme Art. 3 par. 3.

5. CERTIFICATO DI CONFORMITÀ

Quando la valutazione di conformità è stata completata l'O.N. deve rilasciare un documento al fabbricante.

Per i Moduli B, B1, F e G questo documento deve essere un certificato (rif. Annex III), per i Moduli A1 e C1 questo documento può essere un semplice rapporto relativo agli accertamenti della verifica (rif. documento CABF R-013).

Deve essere chiaramente esplicitato che esso concerne un insieme (e non una attrezzatura, anche se singola nell'insieme) e/o una verifica del rispetto dell'art. 10.2.*a*, *b*, e *c*.

5.1. Fabbricante

L'O.N. deve controllare la stesura della Dichiarazione di Conformità del fabbricante.

Deve essere esplicitato che essa è relativa ad un insieme (preferibilmente definito come "insieme", con lista delle attrezzature, rif. art. 10.2).

6. ARGOMENTI SPECIFICI

6.1. Considerando 5

Insieme assemblato presso l'utilizzatore sotto la sua responsabilità; questo accade quando un utilizzatore compra varie attrezzature a pressione , le assembla (sotto la sua responsabilità) e mette in servizio l'assemblaggio presso di sé per il proprio uso.

Questo assemblaggio dovrebbe essere coperto dalla legislazione nazionale del sito dell'utilizzatore.

6.2. Libera scelta della valutazione di conformità?

C'è una differenza relativamente all'obbligo di applicare la valutazione di conformità di un insieme secondo art. 3.2.1 e di un insieme secondo art. 3.2.2 ? No.

L'Art. 3.2.1 non ha il testo "se il fabbricante intende piazzare l'assemblato sul mercato e metterlo in servizio come insieme..."

Apparentemente questo è stato interpretato come se per questo tipo di attrezzatura a pressione in accordo all'art. 3.2.2.1 fosse possibile costruire un insieme senza l'intenzione di piazzarlo

sul mercato e di metterlo in servizio come “insieme”.

Questo significherebbe che il fabbricante abbia la scelta di effettuare la Valutazione di conformità o meno. E in ambedue i casi dovrebbe soddisfare i requisiti della PED.

Ciò non è corretto. Se un assemblaggio rientra nella definizione di “insieme” esso deve soddisfare i requisiti della PED, valutazione di conformità compresa.

Ciò non limita la possibilità di costruire e consegnare parte di un insieme (cioè un sotto-insieme); in accordo alla linea-guida WGP 3-10 la valutazione di conformità finale e globale può essere effettuata in una fase successiva.

La scelta di un fabbricante non consiste nel “Se” un insieme deve essere valutato come tale, ma nel “Quando” deve essere valutato.

7. LINEE-GUIDA WGP

7.1. Chiarimenti sulla linea-guida WGP 3-6 (prova di pressione per un insieme)

Tutti i giunti permanenti di un insieme necessitano di essere assoggettati a prova di pressione. Ciò non è richiesto per i giunti non permanenti.

Esempi di giunti non permanenti: flange, fitting filettati, ecc.

7.2. Chiarimenti sulla linea-guida WGP 3-17 (insieme senza dispositivi di sicurezza)

Questa linea-guida si applica quando dall’ analisi dei rischi è richiesto un dispositivo di sicurezza per proteggere l’insieme dal superamento dei limiti ammissibili.

Un insieme non necessita sempre di essere protetto.

Se un insieme, che richiede un dispositivo di sicurezza che lo protegga dal superamento dei propri limiti ammissibili, viene consegnato all’utilizzatore senza tale dispositivo, può essere o il fabbricante o l’utilizzatore che si assume la responsabilità per l’insieme completato.

Nel primo caso sarà il fabbricante (e il suo O.N., se pertinente) che completerà la valutazione di conformità e effettuerà la marcatura CE.

Nel secondo caso sarà l’utilizzatore (e anche l’Organismo di Controllo nazionale, se è previsto) responsabile della soddisfazione dei requisiti richiesti dalla legislazione nazionale.

7.3. Linee-guida WGP che non necessitano di chiarimenti

Guideline 3-1 assembled by user.
Guideline 3-2 joining operations on site
Guideline 3-3 SEP in manually fed boiler
Guideline 3-4 minimum extend of boiler
Guideline 3-5 CE-marking for assembly 3.2.3
Guideline 3-7 conformity assessment of non CE-marked equipment in an assembly
Guideline 3-8 definition of assembly
Guideline 3-9 application and limits of an assembly
Guideline 3-10 assemblies without CE-marking
Guideline 3-11 equipment in assembly
Guideline 3-12 ESR’s in assembly
Guideline 3-13 non PED equipment in an assembly
Guideline 3-14 CE-marking of 3.2.3 assembly
Guideline 3-15 category of permanent joining in an assembly
Guideline 3-16 highest category

Documento CABF PED/SPV 09-036 rev 2
Traduzione ing. Cannerozzi

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

La valutazione del rischio sismico nella progettazione delle attrezzature a pressione

*V. Annoscia**
*N. Pecere***
*A.M. Altieri**
**ISPESL - Bari - Italy*
***2S.I. Software e Servizi per l'Ingegneria S.r.l. - Ferrara - Italy*

SOMMARIO

Nel presente lavoro è affrontata la progettazione delle attrezzature a pressione in zona sismica, alla luce del recente D.M. INFRASTRUTTURE 14 GENNAIO 2008 (NTC) e della Circolare 2 febbraio 2009, n.617 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni" che, ad eccezione delle strutture di classe 1 e 2, in zona 4, per le quali può ancora applicarsi la norma del 1996, ha modificato in modo sostanziale la progettazione in zona sismica. Di seguito viene pertanto illustrato il metodo di calcolo dell'azione sismica previsto dalla nuova norma e attraverso un esempio numerico viene effettuato un confronto tra il vecchio modo di progettare (D.M. 16-01-1996) e il nuovo modo (D.M. 14-01-2008), sia mediante un'analisi statica che dinamica, lineari.

1. INTRODUZIONE

La classificazione sismica del territorio italiano si è modificata nel tempo, infatti in passato essa era determinata, sostanzialmente, a posteriori, sulla base dei sisma che colpivano le varie zone. Ad esempio nel 1909 la Calabria e la Sicilia furono classificate sismiche dopo il terremoto di Messina del 1908, mentre l'Italia centrale fu classificata sismica dopo il terremoto di Avezzano. Analogamente anche l'intensità venne presa in conto e dopo i terremoti del Friuli e dell'Irpinia furono considerate tre zone sismiche con intensità diversa. Con l'Ordinanza 3274 del 2003 il modo di classificare il territorio nazionale è cambiato adeguandosi agli studi più recenti basati su considerazioni a carattere statistico relativi alla pericolosità sismica, introducendo i concetti di probabilità di superamento P_{VR} in un assegnato tempo V_R e di periodo di ritorno T_R.

La nuova norma (NTC2008) ai fini della prevenzione del rischio di perdite di vite umane considera come riferimento un evento sismico la cui accelerazione di picco abbia la P_{VR}=10% nel tempo V_R=50 anni, cui corrisponde un periodo di ritorno T_R=475 anni.

2. IL D.M. 16.01.1996

Il suolo italiano era suddiviso in sismico e non sismico e per le zone simiche erano individuate tre zone mediante il grado di sismicità S che poteva assumere i valori 6, 9 e 12. Era previsto che il moto del terreno potesse avvenire, non contemporaneamente, secondo due direzioni ortogonali a scelta del progettista, e gli effetti sismici potevano essere valutati sia con analisi dinamica lineare sia, convenzionalmente, mediante un'analisi statica delle strutture soggette a:

• un sistema di forze orizzontali parallele alle direzioni scelte del sisma, con risultante pari a:

$$F_h = C * R * I * W \qquad (1)$$

• un sistema di forze verticali, distribuite sulla struttura proporzionalmente alle masse presenti, con risultante pari a:

$$F_v = m * C * I * W \quad (2)$$

Nel caso di edifici con strutture intelaiate le azioni orizzontali e verticali si valutano con le seguenti relazioni:

$$F_i = K_{hi} * W_i \quad (3)$$

$$K_{hi} = C * R * \varepsilon * \beta * \gamma_i * I \quad (4)$$

$$W_i = G_i + s * Q_i \quad (5)$$

$$F_v = K_v * I * W \quad (6)$$

Il significato dei simboli è il seguente:
C=(S-2)/100 coefficiente di intensità sismica;
S grado di sismicità;
R coefficiente di risposta relativo alla direzione considerata;
I coefficiente di protezione sismica;
W peso complessivo delle masse;
m =2;
G_i somma peso proprio e permanente al piano i-esimo;
Q_i sovraccarico accidentale max al piano i-esimo;
s coefficiente di riduzione del sovraccarico accidentale;
ε coefficiente di fondazione;
β coefficiente di struttura;
γ_i coefficiente di distribuzione delle azioni sismiche al piano i-esimo.

Le verifiche possono essere effettuate sia con il metodo alle tensioni ammissibili sia con il metodo agli stati limite.

3. L'OPCM 3274 DEL 20.03.2003

L'Ordinanza 3274 modifica in modo sostanziale quanto definito nel precedente D.M. 16.01.1996, considerando tutto il suolo italiano sismico, e suddiviso in quattro zone, con valori dell'accelerazione max a_g riportate nella Tabella 1:

Zona	1	2	3	4
Accelerazione max a_g	0,35g	0,25g	0,15g	0,05g

Tabella 1

Le nuove NTC hanno modificato (complicandolo) questo approccio, come descritto in seguito.

Le verifiche si effettuano essenzialmente con il metodo agli stati limite

4. IL D.M. 14.01.2008 (NTC)

Nella nuova norma non si fa più riferimento all'accelerazione prevista nelle quattro zone dell'OPCM 3274 (che comunque rimangono, soprattutto ai fini degli adempimenti di tipo amministrativo), ma l'azione sismica è valutata a partire dalla "pericolosità sismica di base" in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A). Nell'all. B sono fornite le tabelle dei parametri che definiscono l'azione sismica, in particolare per 10751

punti del reticolo di riferimento e per 9 valori del periodo di ritorno T_R (anni: 30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975, 2475) sono dati i valori di

- a_g accelerazione orizzontale massima del terreno;
- F_O valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro di accelerazione orizzontale;
- T^*_C periodo d'inizio del tratto a velocità costante dello spettro di accelerazione orizzontale.

Le forme spettrali previste dalle NTC sono caratterizzate da probabilità di superamento P_{VR} e vite di riferimento V_R; in particolare occorre fissare:

- la vita di riferimento V_R della costruzione;
- la probabilità di superamento P_{VR} nella vita di riferimento.

Infine, come parametro caratterizzante la pericolosità sismica, si definisce il periodo di ritorno dell'azione sismica T_R, funzione di V_R e P_{VR} mediante la relazione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln\left(1 - P_{V_R}\right)} \qquad (7)$$

4.1. Periodo di riferimento per l'azione sismica V_R

È necessario definire, preliminarmente, le seguenti due grandezze:

- la vita nominale V_N;
- il coefficiente d'uso C_U.

La vita nominale di un'opera strutturale V_N è il numero di anni nel quale la struttura deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata e deve essere dichiarata in sede progettuale. La vita nominale è differenziata secondo i tipi di costruzione descritti nella Tabella 2.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise nelle classi d'uso della Tabella 3.

Alle classi d'uso si associano i coefficienti d'uso C_U della Tabella 4.

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale V_N (anni)
1	Opere provvisorie - opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

Tabella 2

CLASSI D'USO	
Classe I	Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.
Classe II	Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti,.... **Industrie con attività non pericolose per l'ambiente**, ...
Classe III	Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. **Industrie con attività pericolose per l'ambiente**, ...
Classe IV	Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti... **Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente.** ...

Tabella 3

VALORI DEL COEFFICIENTE D'USO C_U				
CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

Tabella 4

Possiamo ora calcolare il periodo di riferimento V_R con la seguente relazione:

$$V_R = V_N * C_U \quad (\geq 35\ anni) \tag{8}$$

4.2. Stati limite e relative probabità di superamento

La norma definisce due Stati Limite di Esercizio (SLE) e due Stati Limite Ultimi (SLU):

Gli stati limite di esercizio sono:

- Stato Limite di Operatività (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, elementi strutturali, non strutturali, apparecchiature rilevanti, non devono subire danni o interruzioni d'uso significativi;
- Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, elementi strutturali, non strutturali, apparecchiature rilevanti, subiscono danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali.

Gli stati limite ultimi sono:

- Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLO): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Stati Limite		P_{VR}: Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	Periodo si ritorno T_R (per V_R=50 anni)
Stati limite di esercizio	SLO	81%	30 anni
	SLD	63%	50 anni
Stati limite ultimi	SLV	10%	475 anni
	SLC	5%	975 anni

Tabella 5

Nella Tabella 5 sono riportate le probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} per ogni stato limite e il periodo di ritorno T_R per un assegnato V_R pari a 50 anni.

4.3. Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche

L'azione sismica, come già detto, è valutata a partire dalla "pericolosità sismica di base" in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, pertanto, per tener conto delle reali condizioni dei siti, bisogna far riferimento a parametri che caratterizzino le proprietà sismiche delle diverse tipologie di suoli. Il parametro principale è la $V_{s,30}$, definita come velocità equivalente di propagazione delle onde sismiche di taglio entro i primi 30 m di profondità al di sotto del piano di posa delle fondazioni. Per le fondazioni superficiali (plinti, travi o platee) la profondità è riferita al piano d'imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

La norma individua le 5 categorie di sottosuolo della Tabella 6 a cui si aggiungono le due della Tabella 7, caratterizzate da terreni suscettibili di liquefazione o collasso, e dove sono necessarie specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche.

Per quanto riguarda le condizioni topografiche, la norma individua alcuni casi di semplice applicabilità (Tabella 8), rimandando ad analisi specifiche per la valutazione della risposta locale.

Categoria	Descrizione
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti,* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	*Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m,* posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Tabella 6

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

Tabella 7

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15°$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15°$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15° \leq i \leq 30°$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30°$

Tabella 8

4.4. Valutazione dell'azione sismica

Abbiamo ora tutti gli elementi per definire l'azione sismica, la cui rappresentazione di riferimento in termini delle due componenti orizzontali e di quella verticale, è lo spettro di risposta elastico in accelerazione per uno smorzamento convenzionale del 5%. Tale spettro costituisce la risposta massima in accelerazione del generico sistema dinamico elementare con periodo di oscillazione $T \leq 4$ s ed è dato dal prodotto di una forma spettrale (spettro normalizzato) per l'accelerazione massima del terreno.

4.5. Spettro di risposta elastico in accelerazione

Lo spettro di risposta elastico convenzionale, fornito dalla norma, è l'espressione semplificata e cautelativa degli spettri di risposta elastica dei terremoti che si possono verificare in un dato

sito. Lo spettro, che ha in ascissa il periodo e in ordinata l'accelerazione, può essere suddiviso, in funzione del periodo, in tratti; facendo riferimento alla Figura 1, si ha:

- il diagramma parte dal valore T_A=0 e a_g*S>0 (per terreni differenti dal suolo rigido si ha S>1; infatti si ritiene che le accelerazioni vengano amplificate da strati di terreno soffice);
- da T_A a T_B l'accelerazione max cresce col periodo;
- da T_B a T_C l'accelerazione si mantiene approssimativamente costante; l'amplificazione rispetto all'accelerazione di picco al suolo dipende dalle caratteristiche del sito attraverso un coefficiente F_O, e dallo smorzamento della struttura attraverso un coefficiente η;
- da T_C a T_D la velocità massima si mantiene costante, per cui l'accelerazione varia in modo inversamente proporzionale al periodo;
- per $T>T_D$ resta costante lo spostamento massimo, e la pseudo-accelerazione varia in modo inversamente proporzionale al quadrato del periodo.

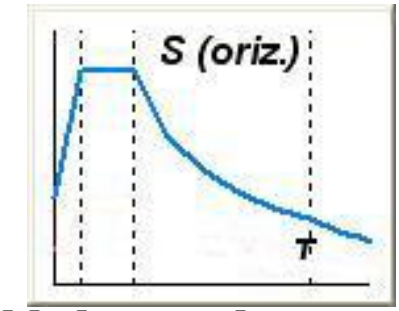


Figura 1

La norma fornisce le seguenti espressioni per il calcolo dell'accelerazione spettrale orizzontale S_e in funzione del periodo di vibrazione T:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \qquad (9)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

In tali relazioni compaiono i seguenti nuovi parametri:

$$S = S_S * S_T \qquad (10)$$

$$T_C = C_C * T_C^* \qquad (11)$$

$$T_B = \frac{T_C}{3} \qquad (12)$$

$$T_D = 4.0 * \frac{a_g}{g} + 1.6 \quad (13)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0.55 \quad (14)$$

In queste ultime relazioni i parametri S_S e C_C dipendono dal tipo di suolo, e sono dati nella Tabella 9, mentre S_T è funzione della categoria topografica ed è dato nella Tabella 10.

Categoria sottosuolo	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80 \cdot$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Tabella 9

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Tabella 10

In definitiva, siamo ora in grado di calcolare lo spettro di risposta elastico in accelerazione; infatti nota la posizione geografica (Lat. e Long.) del sito, la norma fornisce i valori di a_g, F_O e T^*_C, da questi, nota la categoria del suolo (ad es. dalla relazione geologica) si calcolano (mediante la Tabella 9) S_S e C_C e, dalla Tabella 10, S_T e, tramite le relazioni (9)÷(14) si calcolano tutti i punti caratteristici dello spettro.

Per le accelerazioni verticali valgono relazioni simili, per i dettagli si rinvia alle NTC.

4.6. Spettri di progetto per gli SLE

Lo spettro di progetto $S_d(T)$ per tutte le componenti, riferito alla probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR}, è lo spettro elastico corrispondente

4.7. Spettri di progetto per gli SLU, fattore di struttura q

La valutazione della reale risposta di una struttura all'azione di un sisma severo non può essere effettuata considerando il comportamento elastico, ma bisogna tener conto delle riserve

plastiche. Un modo per tenerne conto consiste nel ridurre le forze di progetto mediante un parametro che sia funzione della duttilità locale e globale della struttura. Tale parametro è il fattore di struttura q.

Dallo spettro di risposta elastico $S_e(T)$ si passa allo spettro di progetto $S_d(T)$ (avente ordinate ridotte) attraverso l'uso del fattore di struttura q o, in inglese, behaviour factor (nella traduzione italiana dell'eurocodice 8 è stato tradotto in coefficiente di comportamento); in particolare si utilizzano le relazioni (9), sostituendo al posto di η (smorzamento) il valore 1/q con l'ulteriore condizione:

$$S_d(T) \geq 0.2a_g \qquad (15)$$

La determinazione del fattore di struttura q, incidendo notevolmente sullo spettro di progetto, rappresenta un passo fondamentale della progettazione. Nel caso si possa considerare la tipologia del pendolo inverso q assume il valore 2,0, che va ridotto a q=1,6 nel caso di struttura non regolare in altezza. È utile precisare che nella vecchia normativa sismica del '96 lo spettro di progetto proposto conteneva implicitamente un fattore di struttura pari a circa 5, mentre un riferimento alla duttilità (ad esempio se l'azione sismica era affidata a pochi setti o a tutti i pilastri) era contenuta nel coefficiente di struttura β.

4.8. Combinazione dell'azione sismica con altre azioni

Detti G_1 (Peso proprio elementi strutturali), G_2 (Peso proprio elementi non strutturali) le azioni permanenti, E l'azione sismica, ψ21QK1, ψ22QK2,...,ψ2jQKj i carichi variabili con i rispettivi coefficienti ψ2j dati nella Tabella 11, la combinazione sismica, da utilizzare per gli SLU o gli SLE, è la seguente:

$$E + G_1 + G_2 + \psi_{21} * Q_{k1} + \psi_{22} * Q_{k2} + \ \ldots \qquad (16)$$

come si evince dalla Tabella 11 il sisma non si combina con il vento.

Categoria/Azione variabile	ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,3
Categoria B Uffici	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,3
Categoria H Coperture	0,0
Vento	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,2
Variazioni termiche	0,0

Tabella 11

5. EUROCODICE 8 - PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE PER LA RESISTENZA SISMICA - PARTE 4. SILOS, SERBATOI (TANKS) E CONDOTTE (CENNI)

Le NTC non fanno esplicito riferimento alle attrezzature a pressione come i serbatoi o i tanks, ma essendo le norme italiane molto simili agli eurocodici, è possibile estendere le conoscenze acquisite con le NTC all'utilizzo degli eurocodici, come la UNI EN 1998-4:2006 (Eurocodice 8), di cui, nel presente lavoro, si commentano alcuni dei paragrafi.

La norma, in accordo con le NTC, prevede l'utilizzo degli Ultimate Limit State (stati limite ultimi) con uno spettro di progetto dell'azione sismica ottenuto (come nelle NTC) da quello elastico ridotto del fattore di struttura q (behaviour factor) e i Damage limitation state (Stati limite di esercizio).

In generale, il modello di calcolo per la determinazione degli effetti sismici, deve essere in grado di rappresentare la rigidezza, la resistenza, lo smorzamento, la massa e la geometria del serbatoio, e deve tener conto della risposta idrodinamica dell'eventuale liquido contenuto e, se necessario, anche dell'interazione con il terreno di fondazione. Nel calcolo si assumerà un comportamento lineare elastico salvo casi particolari, e si terrà conto, dove lo si riterrà necessario, anche dell'interazione tra serbatoi connessi, ad esempio mediante piping.

Gli effetti idrodinamici dovuti all'azione sismica, a rigore, dovrebbero essere desunti dalla soluzione delle equazioni idrodinamiche con le opportune condizioni al contorno, tenendo conto della componente convettiva (sloshing) e impulsiva del moto del liquido, della deformazione del serbatoio per effetto delle pressioni idrodinamiche, dell'interazione con la componente impulsiva e della deformabilità del terreno di fondazione. Tale tipo di analisi, anche se di particolare complessità, è oggi affrontabile con alcuni dei software in commercio, come Ls-Dyna, Ansys, Comsol, ecc..., di cui sul web è possibile trovare diverse applicazioni. Sono software che mediante tecniche numeriche agli elementi finiti permettono le analisi FSI (Fluid-structure interaction), risolvendo le equazioni di Navier-Stokes accoppiate al problema strutturale, è quindi possibile tener conto contemporaneamente di fenomeni come lo sloshing e degli effetti di instabilità tipo l'elephant's foot buckling. Nell'Eurocodice, in annex A, sono riportate metodologie di calcolo semplificate costituite da formule, grafici e tabelle che consentono di effettuare la progettazione sismica dei tanks, tenendo conto degli effetti idrodinamici e dei problemi di buckling.

6. ESEMPIO APPLICATIVO

Come esempio applicativo si analizza, con l'ausilio del software ProSap, un semplice serbatoio cilindrico ad asse verticale poggiato su gambe in acciaio, non contenente massa liquida o solida, ipotizzato situato in una città la cui sismicità è tristemente nota a seguito del recente terremoto: L'Aquila. In particolare lo stesso modello è stato analizzato con la norma del '96 e l'attuale NTC sia in analisi dinamica lineare che statica equivalente.

Dati del serbatoio: Diametro= 3000 mm; Spessore= 20 mm; Lunghezza= 13000 mm; Altezza gambe= 2500 mm; Sezione gambe: Tubolare ∅219,5 mm, sp.= 12.5 mm; Materiale= acciaio al carbonio; Altezza totale da terra= 14000 mm. Grado di sismicità secondo DM. '96: S=9.Secondo NTC2008 (vedi Figura 2); fattore di struttura q=1,6 (schema a pendolo inverso non regolare in altezza).

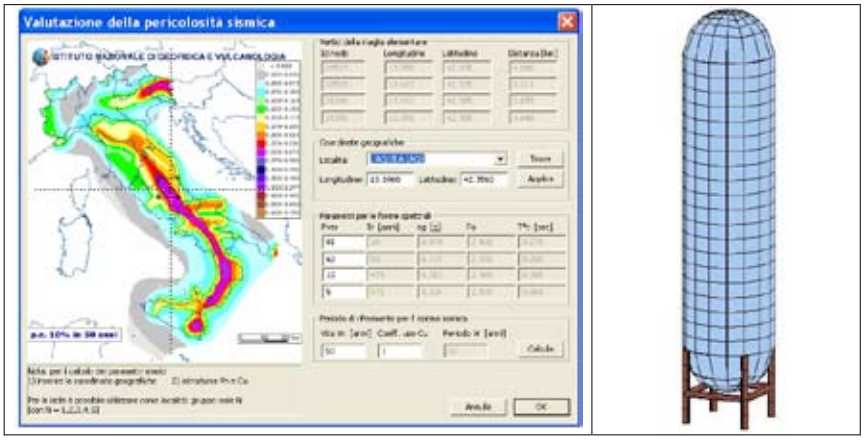


Figura 2

Come elemento di confronto si fornisce nella Tabella 12 l'azione tagliante alla base dovuta al sisma, calcolata allo SLU (cfr. Figura 3).

	DM. '96 Statica	DM. '96 Dinamica	NTC2008 Statica	NTC2008 Dinamica
Taglio alla base daN	2107	1971	7471	7223

Tabella 12

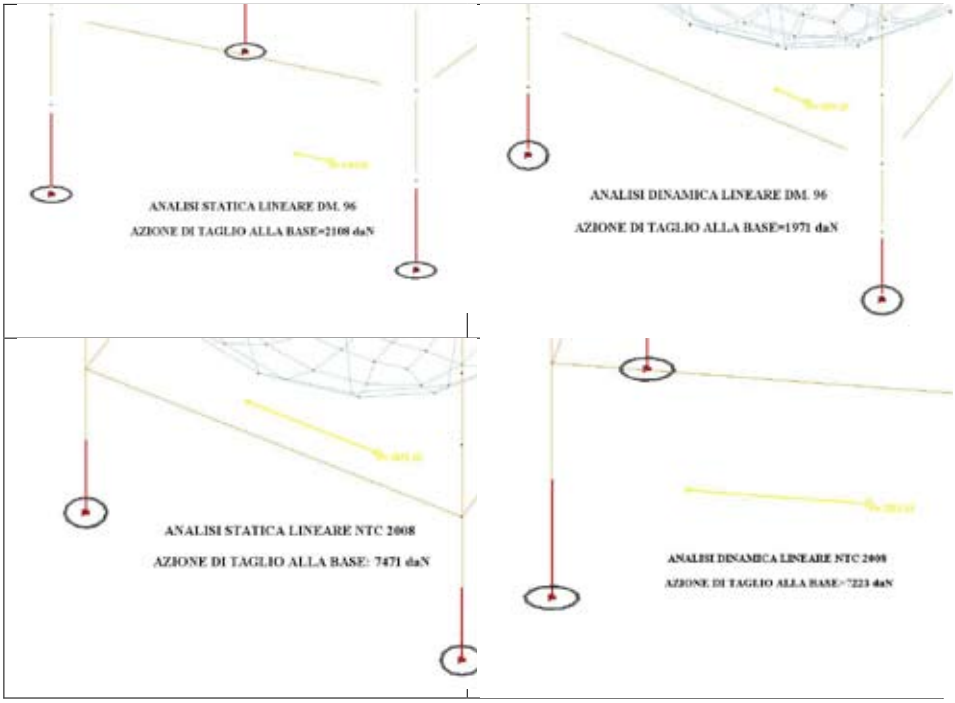


Figura 3

7. CONCLUSIONI

La progettazione delle attrezzature a pressione deve tener conto, fra l'altro, delle sollecitazioni dovute ai terremoti (v. D.Lgs. 93/2000 – All. I - p.2.1.1.).

Nel presente lavoro si è cercato di determinare l'ordine di grandezza delle azioni sismiche e, in particolare, si è preso in esame un serbatoio verticale confrontando l'azione tagliante alla base, determinata con le vecchie e le nuove norme.

Dal confronto si evince che con le NTC l'azione sismica diventa un fattore notevole, dello stesso ordine di grandezza del vento (in certi casi superiore), diventando così elemento decisivo per il dimensionamento degli elementi di sostegno.

In questo lavoro non si è preso in esame il caso di serbatoi contenenti massa allo stato liquido, che richiederebbe, data la complessità del fenomeno, una specifica trattazione.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] A. Ghersi e P. Lenza; " Edifici antisismici in cemento armato progettati secondo le indicazioni delle nuove normative ", Dario Flaccovio editore, Palermo,2009

[2] M. De Angelis1, R. Giannini and F. Paolacci; " Experimental investigation on the seismic response of a steel liquid storage tank equipped with floating roof by shaking table tests", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* - 2009

[3] R. Dotoli, D. Lisi, D. Bardaro, M. Perillo and M. Tomasi; " Sloshing Response of a Lng Storage Tank" negli Atti della Conferenza su *6th European LS-DYNA Users' Conference*, pp. 5.173-5.180, 2006

[4] Kyung-Hwan Cho and Seong-Yong Cho; " Seismic Response of Cylindrical Steel Tanks Considering Fluid-Structure Interaction ", *Steel Structures* 7, 2007, pp. 147-152

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

Aspetti critici per la verifica sismica secondo le NTC dei serbatoi criogenici in pressione

E. Leoni - F. Rossi**
**Air Liquide Italia*

Alla luce dell'emanazione della recente normativa sismica nazionale "Norme tecniche per le costruzioni" si è posto il problema di come gestire l'installazione di stoccaggi criogenici. È affrontato pertanto il problema di come garantire la corretta rispondenza alle normative sismiche nell'installazione di serbatoi ed apparecchiature criogeniche costruite negli ultimi quarant'anni che, data la natura dei contratti a breve termine e in forma di comodato d'uso, sono destinate ad essere spostate ed installate presso diversi clienti e in diverse località sul territorio nazionale.

Queste domande sono alla base del progetto che AL sta sviluppando nell'ottica di garantire, oltre una risposta alle normative di settore, una maggior sicurezza ed efficienza delle proprie installazioni.

Le NTC, conformi agli Eurocodici, hanno fortemente innovato la modalità di calcolo dell'input sismico, sostituendosi all'OPCM 3519 e ponendosi all'avanguardia mondiale.

Per determinare gli effetti dell'azione sismica sulla struttura e poter verificare elementi più critici del serbatoio, quali gambe, fasciame, zone di saldatura gambe – fasciame, sono eseguite analisi modali con spettro di risposta o analisi lineare dinamica. L'obiettivo è quello di stabilire le possibili aree d'installazione di una famiglia di serbatoi sul territorio nazionale in relazione alla mappa di pericolosità sismica fornita dall'INGV. A seguito delle analisi sismiche l'approccio consiste nel valutare secondo NTC l'accelerazione orizzontale a_g massima sopportabile dal serbatoio e nel confrontarla con l'accelerazione a_g fornita dall'INGV per tutto il territorio nazionale, al fine di stabilire di installare i serbatoi su tutto il territorio nazionale in cui risulta un a_g minore dell'a_g massima sopportabile dal serbatoio.

1. DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA SECONDO LE NTC

In Italia dal 1 gennaio 2009 sono entrate in vigore le "Norme tecniche per le costruzioni" (D.M. 14 gennaio 2008) che adottano un approccio prestazionale alla progettazione delle nuove strutture e alla verifica di quelle esistenti. Nei riguardi dell'azione sismica la nuova norma ha fortemente innovato la modalità di calcolo dell'input sismico, di fatto, ponendosi all'avanguardia mondiale e sostituendo l'Ordinanza PCM 3519, che dava criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche del territorio nazionale.

Il nostro obiettivo è stabilire come gestire l'installazione di stoccaggi criogenici alla luce della recente normativa sismica nazionale.

"L'azione sismica è ora valutata in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido a superficie orizzontale, riferendosi non ad una zona sismica territorialmente coincidente con più entità amministrative, ad un'unica forma spettrale e ad un periodo di ritorno prefissato ed uguale per tutte le costruzioni, come avveniva in precedenza, bensì sito per sito e costruzione per costruzione" [C3.2- Circ. NTC].

Le NTC presentano pertanto molte e significative novità nella definizione dell'azione sismica;

si può dire che le differenze principali tra le Norme Tecniche e l'OPCM risiedono nella diversa mappatura sismica del territorio nazionale e nel calcolo dell'azione sismica che prevede la definizione di nuovi parametri.

Sono analizzati dapprima i punti sostanziali di differenza tra le vecchie e nuove norme tecniche nei riguardi del sisma, facendo in seguito le opportune ipotesi di calcolo dell'azione sismica considerando le strutture serbatoio.

Il nuovo regolamento sismico italiano richiede la definizione dello spettro di progetto, sulla base della nuova mappa sismica nazionale. Rispetto alla precedente normativa, il territorio nazionale non risulta più diviso in quattro zone di pericolosità sismica ciascuna contrassegnata da un valore d'accelerazione orizzontale massima a_g, ma è diviso in un reticolo di riferimento di 10751 punti definiti in termini di latitudine e longitudine, sufficientemente vicini tra loro (distano non più di 10km), per i quali a_g è definita puntualmente.

Vengono a tal proposito utilizzate al meglio le possibilità offerte dalla definizione della pericolosità sismica italiana recentemente prodotta e messa in rete dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

L'INGV fornisce infatti la mappa di pericolosità sismica (originale) del territorio italiano (Figura 1) considerando l'accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

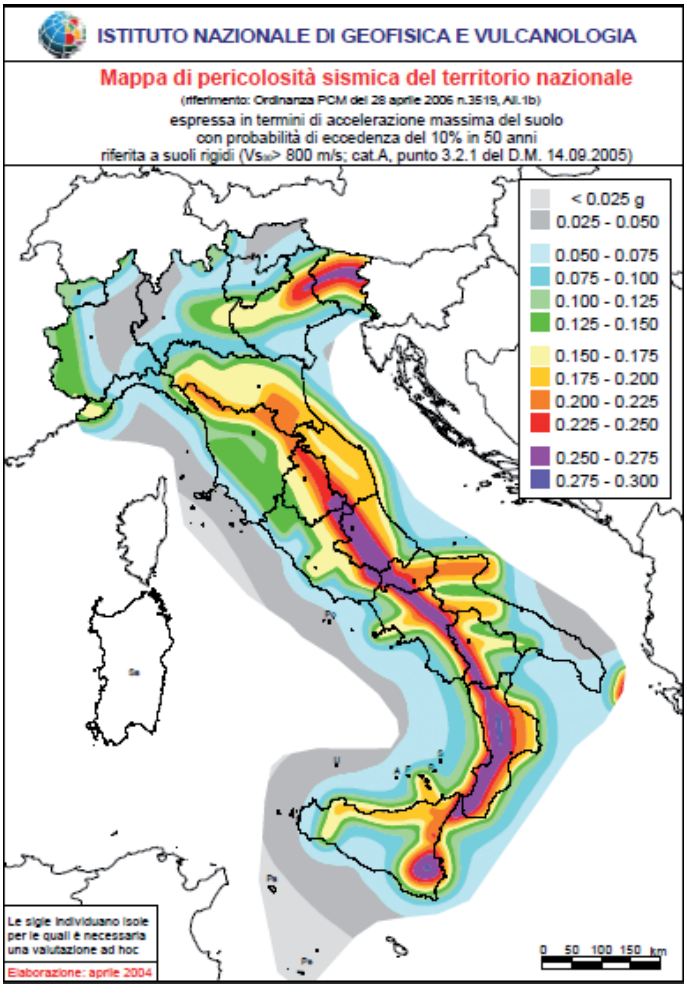


Fig. 1 - Mappa della pericolosità sismica

Lo studio svolto dall'INGV, fatto dalla Protezione Civile, inoltre fornisce per l'intero territorio nazionale gli spettri di risposta elastici relativi ad eventi sismici attesi con diversi periodi di ritorno. Con la nuova normativa italiana si accolgono tali studi riconducendo però sempre la forma spettrale a quella dell' Eurocodice 8 e a quella prevista anche dalla precedente normativa italiana.

Nelle NTC l'azione sismica è definita da tre nuovi parametri fondamentali: a_g accelerazione orizzontale massima al sito, F_o valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale, T^*_C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale. I valori d' a_g F_o T^*_C sono riportati nell'Allegato B alle NTC; di essi è fornita la rappresentazione in termini di andamento medio in funzione del periodo di ritorno e dei punti del reticolo per l'intero territorio nazionale. I caratteri del moto sismico su sito di riferimento rigido orizzontale sono pertanto descritti dalla distribuzione sul territorio nazionale dei predetti parametri, sulla base delle quali sono definite le forme spettrali.

Aspetto critico delle nuove norme è che sono state pensate soprattutto per opere civili, che quindi nascono e rimangono localizzate in un certo sito senza subire spostamenti; ciò non vale per i nostri serbatoi che sono unità mobili e rimangono in media installati in un sito presso il cliente per circa dieci anni dopodichè possono subire installazioni in altri siti. Pertanto il problema iniziale è quello di stabilire come rapportarsi con le NTC, soprattutto per la definizione dell'azione sismica essendo a_g in funzione del periodo di ritorno e anche delle coordinate geografiche del sito.

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione dell'opera, nel caso nostro caso del sito di installazione del serbatoio. Essa costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche. La pericolosità sismica di un sito è descritta dalla probabilità che, in un fissato lasso di tempo, in quel sito si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore prefissato. Nelle NTC tale lasso di tempo, espresso in anni, è denominato"periodo di riferimento" V_R e la probabilità è denominata " probabilità di superamento nel periodo di riferimento" P_{VR}.

Ai fini della determinazione delle azioni sismiche di progetto, la pericolosità sismica del territorio nazionale è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g , convenzionalmente su sito di riferimento rigido (di categoria A) con superficie topografica orizzontale (di categoria T1) in condizioni di campo libero, e in termini di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento V_R.

Il periodo di riferimento V_R, valutato moltiplicando la vita nominale V_N , che dipende dal tipo di opera, per il coefficiente d'uso C_U , che dipende dalla classe d'uso cioè dalla funzione dell'opera, riveste notevole importanza in quanto è utilizzato nel valutare, fissata la probabilità di superamento P_{VR} corrispondente allo stato limite considerato, il periodo di ritorno T_R dell'azione sismica.

Nel caso di strutture quali serbatoi sono state fatte le seguenti ipotesi. I serbatoi si considerano appartenenti alla classe d'uso II [2.4.2 - NTC] con coefficiente d'uso pari a C_u = 1 [2.4.3 - NTC]. Si ritiene inoltre che in media un serbatoio possa esser utilizzato, purché soggetto alla manutenzione ordinaria, per circa 35, 50 anni [Tabella 2.4.I - NTC]; si è assunta pertanto una vita nominale di 50 anni, intesa come periodo nel quale il serbatoio deve poter esser usato per lo scopo al quale è destinato, e non come periodo di installazione in un sito. Pertanto si considera un periodo di riferimento:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 50\,anni \qquad (1)$$

La probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} è individuata in funzione dello stato limite considerato e a cui riferirsi per calcolare l'azione sismica [Tabella 3.2.I - NTC]. Le NTC prevedono quattro stati limite: due d'esercizio, Stato Limite di Operatività (SLO) e Stato Limite di Danno (SLD), e due ultimi, Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e Stato Limite di Collasso (SLC), per i quali rispettivamente P_{VR} vale 81%, 63%, 10%, 5%. Per le classi d'uso I e II, il rispetto dei vari stati limite si considera conseguito nei confronti di tutti gli stati limite

d'esercizio qualora siano rispettate le verifiche relative al solo SLD, nei confronti di tutti gli stati limite ultimi qualora siano soddisfatte le verifiche relative al solo SLV [7.1 - NTC].

Dato che sono previste sui serbatoi verifiche agli stati limite ultimi lo spettro di risposta dell'azione sismica è calcolato allo SLV, a cui corrisponde una P_{VR} pari a 10%.

Noto P_{VR} e V_R , il periodo di ritorno dell'azione sismica T_R risulta:

$$SLV \quad \rightarrow \quad T_R = -\frac{V_R}{\ln(1-P_{VR})} = 475 anni \qquad (2)$$

Il periodo di ritorno dell'azione sismica non è più quindi modulato attraverso un coefficiente d'importanza γ_1 , ma sulla base della vita nominale V_N e del coefficiente d'uso C_U , ovvero per l'esattezza sulla base del periodo di riferiment $V_R = V_N \bullet C_U$o

Noto il periodo di ritorno dell'azione sismica, le forme spettrali sono definite a partire dai valori dei parametri su sito di riferimento rigido orizzontale: a_g, F_o, T^*_C.

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione orizzontale è espresso da una forma spettrale riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5%, moltiplicata per il valore dell' accelerazione orizzontale massima a_g su sito di riferimento orizzontale. Lo spettro di risposta elastico della componente orizzontale è definito dalle espressioni seguenti [3.2.3.2.1 - NTC]:

$$\begin{aligned}
&0 \le T < T_B && S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
&T_B \le T < T_C && S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \\
&T_C \le T < T_D && S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\
&0 \le T < T_B && S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)
\end{aligned} \qquad (3)$$

Le condizioni di sito di riferimento rigido in generale non corrispondono a quelle effettive. Bisogna pertanto tener conto delle condizioni stratigrafiche e topografiche del territorio italiano, in media si può assumere una categoria di sottosuolo di tipo C e categoria topografica T1. Nella formula (3) S è il coefficiente che tiene conto infatti della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione $S = S_S \cdot S_T$, essendo S_S il coefficiente di amplificazione stratigrafica [Tabella 3.3.V - NTC] e S_T il coefficiente di amplificazione topografica [Tabella 3.2.I - NTC] pari a 1 per categoria topografica T_1; η è assunto pari a 1 per coefficiente di smorzamento viscoso convenzionale assunto pari al 5%; T_C è periodo corrispondente alla fine del tratto ad accelerazione costante dello spettro $T_C = C_C \cdot T_C^*$ in cui C_C è funzione della categoria di sottosuolo C [Tabella 3.2.V - NTC]; T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante, pari a $T_B = T_C/3$; T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro $T_D = 4 \cdot (a_g/g)+1{,}6$.

Lo spettro di progetto allo SLV si ricava dallo spettro elastico riducendo le ordinate del fattore di struttura q. Per i serbatoi generalmente si fa riferimento ad un fattore di struttura pari a $q = 1{,}5$ [EN1998-4].

Per quanto riguarda la componente verticale della azione sismica essa non viene considerata in quanto le NTC prevedono che sia presa in considerazione solo in presenza di alcune tipologie strutturali, tra le quali non rientrano i serbatoi.

Si deve inoltre tener presente che da giugno 2010 entreranno in vigore gli Eurocodici. Ogni nazione è libera di mantenere e usare le proprie Norme tecniche a patto che queste siano conformi agli Eurocodici. Per quanto riguarda l'Italia, le NTC sono state redatte con lo stesso formato degli Eurocodici e sono pertanto coerenti con la loro impostazione. Per esempio lo spettro di risposta elastico, nonostante fornisca dei valori diversi d'accelerazione, mantiene la stessa forma spettrale definita dall'Eurocodice.

La forma spettrale per le componenti orizzontali è definita mediante le stesse espressioni fornite dall'EN1998 nelle quali tuttavia non si è assunto un singolo valore per l'amplificazione massima ma si è fornita tale grandezza, F_o, in funzione della pericolosità del sito insieme alle grandezze a_g, T_C e conseguentemente T_B, T_C.

In mancanza di specifiche tecniche le NTC rimandano agli Eurocodici. Per quanto riguarda i serbatoi si fa riferimento, oltre che alle NTC, all'Eurocodice 8 parte 4 (EN1998-4), relativo al progetto di strutture resistenti al sisma con riferimento specifico ai silos, serbatoi e tubi, e all'Eurocodice 3 parte 6 (EN1993-1-6), relativo alla resistenza e stabilità dei gusci.

Il nostro obiettivo è quello di stabilire le possibili aree di installazione di una famiglia di serbatoi sul territorio nazionale in relazione alla mappa di pericolosità sismica fornita dall' INGV.

I serbatoi, come già detto, sono apparecchiature mobili, sussiste pertanto il problema di stabilire se sarà possibile installarli ovunque sul territorio nazionale o solo in alcune zone.

Si è deciso di procedere ipotizzando la possibile installazione dei serbatoi nella zona sul territorio italiano a rischio sismico maggiore, ovvero in Sicilia dove si registra l'accelerazione orizzontale a_g massima pari a circa 0,3g. Con tale ipotesi e con le ipotesi fatte in precedenza per definire i parametri riportati in Tabella 1 e in Tabella 2, che concorrono al calcolo del sisma, si ottiene lo spettro di progetto allo SLV riportato in Figura 2.

ID 306695	SLV: T_R = 475 anni
ag [g]	0,28
Fo	2,28
Tc* [s]	0,42

Tabella 1 – Valori dei parametri per la valutazione dell'azione sismica

	SLV: T_R = 475 anni
Ss	1,32
Cc	1,39
St	1,00
S	1,32
Tb [s]	0,20
Tc [s]	0,59
Td [s]	2,71
q	1,50

Tabella 2 – Valore dei parametri per la costruzione dello spettro di risposta elastico

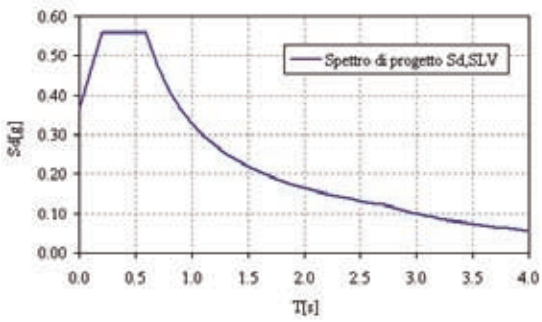


Fig. 2 – Spettro di risposta di progetto delle componenti orizzontali allo SLV

Per tutti i serbatoi in questione sono dapprima condotte analisi sismiche considerando tale spettro di progetto, corrispondente all'a_g massimo pari a quasi 0,3g. Nel caso in cui non siano soddisfatte le verifiche si procede rifacendo le analisi con uno spettro di ordinate spettrali minori, ovvero diminuendo il valore di a_g da 0,3g a 0,25g, 0,20g, 0,15g..ecc fino al soddisfacimento delle verifiche.
Il nostro approccio consiste nel valutare l'accelerazione a_g massima sopportabile dal serbatoio e nel confrontarla con l'a_g con probabilità di superamento del 10% in 50 anni fornita dall'INGV per tutto il territorio nazionale, al fine di poter stabilire di installare i serbatoi in tutte quelle zone sul territorio nazionale in cui risulta un a_g minore dell'a_g massima sopportabile dal serbatoio.

2. ANALISI LINEARE DINAMICA

Le analisi sismiche sui serbatoi sono eseguite tramite un sistema di calcolo ad elementi finiti. I serbatoi sono modellati come il serbatoio esempio in Figura 3.

Il metodo di analisi lineare di riferimento per determinare gli effetti dell'azione sismica sulla

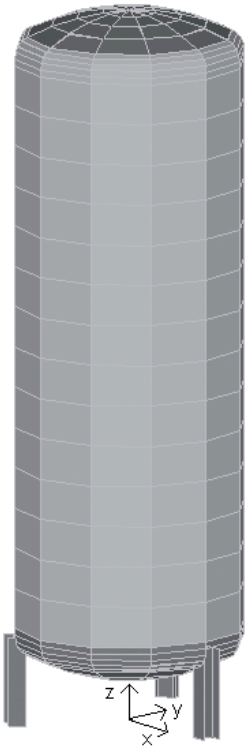


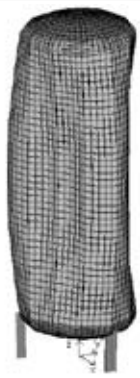
Fig. 3 – Modello di un serbatoio tramite sistema di calcolo ad elementi finiti

struttura è l'analisi modale con spettro di risposta o analisi lineare dinamica. In essa l'equilibrio è trattato dinamicamente e l'azione sismica è modellata direttamente attraverso lo spettro di progetto. L'analisi dinamica lineare consiste nella determinazione dei modi di vibrare della struttura (analisi modale); nel calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per ciascuno dei modi di vibrare individuati; nella combinazione di questi effetti.

L'analisi modale associata all'analisi con spettro di risposta è effettuata considerando la totalità dei modi di vibrare del modello (12). Di seguito nella Tabella 3 e nella Figura 4 sono riportati a titolo di esempio i risultati dell'analisi modale condotta sul serbatoio di 23000Ltr riportato in Figura 3.

Modo	Periodo [s]	Frequenza [Hz]	CircFreq [rad/s]
1	2.163E-01	4.622E+00	2.904E+01
2	2.163E-01	4.622E+00	2.904E+01
3	1.199E-01	8.342E+00	5.242E+01
4	1.190E-01	8.404E+00	5.280E+01
5	1.184E-01	8.448E+00	5.308E+01
6	1.184E-01	8.448E+00	5.308E+01
7	1.140E-01	8.772E+00	5.512E+01
8	8.850E-02	1.130E+01	7.100E+01
9	8.850E-02	1.130E+01	7.100E+01
10	7.639E-02	1.309E+01	8.225E+01
11	7.639E-02	1.309E+01	8.225E+01
12	6.578E-02	1.520E+01	9.552E+01

Tabella 3 – Frequenze proprie

1° modo di vibrare – T=0,216	2° modo di vibrare – T=0,216	3° modo di vibrare – T=0,119s
		
4° modo di vibrare – T=0,119	5° modo di vibrare – T=0,118s	6° modo di vibrare – T=0,118
		

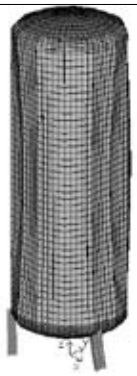
7° modo di vibrare – T=0,114	8° modo di vibrare – T=0,088	9° modo di vibrare – T=0,088
		
10° modo di vibrare – T=0,076	11° modo di vibrare – T=0,076	12° modo di vibrare – T=0,065
		

Fig. 4 – Forme modali

La combinazione dei modi, al fine del calcolo delle sollecitazioni e degli spostamenti, è effettuata attraverso una combinazione quadratica completa (CQC):

$$E = (\sum_i \sum_j \rho_{ij} E_i E_j)^{1/2} \qquad (4)$$

dove E è il valore totale della componente di risposta sismica che si sta considerando, E_i è il valore della medesima componente dovuta al modo i, E_j è il valore della medesima componente dovuta al modo j, $\rho_{ij}(\xi)$ è il coefficiente di correlazione tra il modo i e il modo j, ξ è il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (posto pari a 0,05).

Per quanto riguarda la combinazione delle componenti dell'azione sismica, i valori massimi della risposta ottenuti da ciascuna delle due azioni orizzontali applicate separatamente sono combinati sommando ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nell'altra direzione [7.3.5 - NTC]. Gli effetti sulla struttura sono quindi combinati applicando, con rotazione dei coefficienti moltiplicativi e cambiamento di segno, la seguente espressione:

$$1{,}00 \cdot E_x + 0{,}3 \cdot E_y \qquad (5)$$

Si considerano pertanto otto diverse combinazioni:

$$1°: E_x + 0{,}3 \cdot E_y \quad ; \quad 2°: E_x - 0{,}3 \cdot E_y$$
$$3°: -E_x - 0{,}3 \cdot E_y \quad ; \quad 4°: -E_x + 0{,}3 \cdot E_y \qquad (6)$$

$$5°: 0{,}3 \cdot E_x + E_y \quad ; \quad 6° : -0{,}3 \cdot E_x + E_y$$
$$7°: -0{,}3 \cdot E_x - E_y \quad ; \quad 8° : 0{,}3 \cdot E_x - E_y$$

A ciascuna combinazione sono poi sommati i valori degli effetti dovuti ai carichi verticali valutati nella combinazione sismica [3.2.4 – NTC]. Le verifiche allo SLV sono quindi effettuate considerando le sollecitazioni ottenute dalle 8 diverse combinazioni del tipo

$$G_1 + G_2 + E + \psi_2 \cdot Q_k \qquad (7)$$

dove E è l'azione sismica per lo stato limite in esame, G è il valore caratteristico delle azioni permanenti, Q è il valore caratteristico delle azioni accidentali, ψ_2 è il coefficiente di combinazione [Tabella 2.5.I - NTC].

3. VERIFICA DEGLI ELEMENTI CRITICI

Gli elementi più critici del serbatoio, che pertanto richiedono particolare attenzione e necessitano di esser sottoposti a verifica, sono le gambe e il fasciame, soprattutto in corrispondenza dei punti di saldatura di quest'ultimo con le gambe. Dalle analisi dinamiche lineari condotte infatti risulta che le zone del serbatoio più sollecitate sono i punti di saldatura fasciame – gambe, come si può notare anche dalla Figura 5 riportante l'andamento del campo di sollecitazioni di membrana e di bending sul serbatoio considerato qui come esempio.

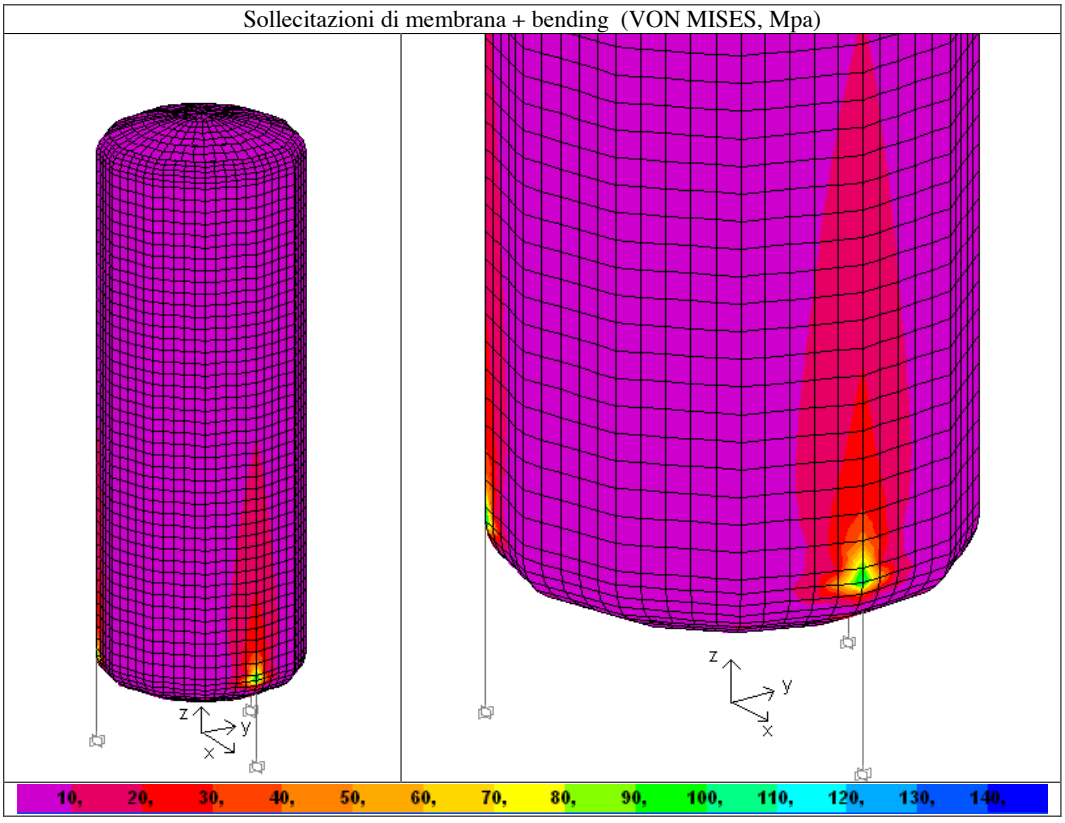


Fig. 5 – Campo delle sollecitazioni di membrana e di bending

Il fasciame è verificato secondo il criterio di resistenza di Von Mises [7.2 – EN1993-1-6]. Si confronta pertanto il valore della tensione equivalente di Von Mises con la tensione ammissibile:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_I{}^2 - \sigma_I \sigma_{II} + \sigma_{II}{}^2} \leq 2 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{Mo}} \qquad (8)$$

dove σ_I, σ_{II} sono le tensioni agenti nel sistema di riferimento principale, f_{yk} è la tensione caratteristica di snervamento e γ_{MO} è il coefficiente di sicurezza pari a 1,05.

Le gambe invece richiedono una verifica di presso o tenso flessione deviata e una verifica al taglio [4.2.4.1 – NTC]:

$$\frac{M_{x,Ed}}{M_{N.x,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{N.y,Rd}} \leq 1 \qquad (9)$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1 \qquad (10)$$

dove $M_{x,Ed}$, $M_{y,Ed}$, V_{Ed} sono rispettivamente i momenti flettenti di calcolo nelle due direzioni e l'azione tagliante di calcolo, $M_{Nx,Rd}$, $M_{N,y,Rd}$, $V_{c,Rd}$ sono rispettivamente le resistenze convenzionale di calcolo a flessione retta nelle due direzioni e la resistenza di calcolo a taglio.

4. DEFINIZIONE DELLE AREE DI INSTALLAZIONE DELLE APPARECCHIATURE CRIOGENICHE

Come già affermato precedentemente le analisi dinamiche lineari sono effettuate inizialmente considerando uno spettro di risposta di progetto come quelle riportato in Figura 2, corrispondente a un'accelerazione orizzontale a_g massima. Nel caso in cui le verifiche non sono rispettate si procede nel ripetere le analisi con uno spettro di risposta di progetto corrispondente ad a_g inferiore, fino al soddisfacimento delle verifiche stesse.

Nel caso del serbatoio qui riportato le verifiche sono soddisfatte nell'ipotesi iniziale di considerare uno spettro di progetto con a_g massima, pertanto si può stabilire di poter installare tali modelli di serbatoio su tutto il territorio nazionale. In caso contrario si doveva procedere nel ripetere le analisi valutando l'accelerazione orizzontale a_g sopportabile dal serbatoio al fine di soddisfare le verifiche, stabilendo pertanto di installare quel tipo di serbatoio in tutte le zone d'Italia in cui, secondo la mappa riportata in Figura 1, risultava un accelerazione a_g fornita dall'INGV inferiore all'accelerazione a_g calcolata.

Seguendo tale approccio si può stabilire pertanto per ogni apparecchiatura criogenia la massima sollecitazione sismica sopportabile dalla stessa, al fine di individuare le possibili zone d'installazione sul territorio italiano garantendo una maggior sicurezza ed efficienza delle proprie installazioni.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] "Norme tecniche per le costruzioni" D.M. 14.1.2008

[2] "Progetto di strutture in acciaio – Resistenza e stabilità dei gusci" EN 1993-1-6

[3] "Progetto di strutture resistenti al sisma – Silos serbatoi e tubi" EN 1998-4

[4] Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia: "Redazione della mappa di pericolosità sismica", Roma, 2004

[5] sito: http://zonesismiche.mi.ingv.it/

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

La progettazione secondo il codice EN 13445 ed ASME VIII div.1 degli apparecchi in pressione in regime di scorrimento viscoso. Confronto tra differenti metodologie di calcolo

*F. Lorino**
*G. Perozzi***
**Microtechno Snc*
***Eleo2 Engineering Srl*

SOMMARIO

La progettazione degli apparecchi in pressione operanti in regime di scorrimento viscoso presenta una serie di problematiche legate alla particolare condizione di funzionamento degli apparecchi stessi, la combinazione dei parametri di tempo e temperatura e delle azioni meccaniche implica un'attenzione alla sicurezza ed ai costi superiore alla normale progettazione. Ad oggi non tutti i codici di calcolo prevedono e trattano l' argomento in modo esaustivo e semplificato; vengono presi in esame l'ASME VIII div.1 ed EN 13445-3. I parametri principali che influenzano una particolare scelta progettuale/metodo di calcolo vengono individuati ed esplicitati; infine 2 esempi di calcolo per 2 reattori soggetti a differenti condizioni di progetto vengono esaminati

1. INTRODUZIONE

La progettazione in regime di creep è un argomento che sta assumendo sempre maggiore rilevanza, visto il crescente aumento delle temperature nei processi dell'industria chimica e petrolchimica, negli impianti di generazione di energia, nel campo nucleare ed in altri processi industriali.

Possiamo definire come scorrimento viscoso "la deformazione permanente di un materiale soggetto ad un carico costante che si sviluppa nel tempo fino a rottura del materiale stesso."

Dalla definizione si evincono due particolarità rispetto al comportamento di un materiale in campo elastico: la presenza di una deformazione permanente e la dipendenza del fenomeno dal tempo; per questo motivo è necessario mettere in relazione le variabili sollecitazione/deformazione anche in funzione del parametro tempo.

La creazione di diagrammi che correlano sollecitazione, deformazione e tempo avviene su base sperimentale, sottoponendo un provino a 100, 1000, 10000 ore o la rottura se questa interviene prima; sorge però la necessità di correlare le variabili da cui dipende il fenomeno dello scorrimento viscoso in modo da poter estrapolare i dati su tempi più lunghi, paragonabili a quelli che sono i tempi di vita degli impianti, per poterli usare nella progettazione degli impianti stessi.

A tale scopo sono state proposte moltissime relazioni che correlano tra loro i vari parametri.

Per quanto riguarda le variabili: deformazione, tempo e sollecitazione la relazione più usata è la relazione bilogaritmica

$$\log \sigma = A - (\log t)/n \qquad (1)$$

essendo A funzione della deformazione **e**, ed n una costante del materiale dipendente dalla temperatura. Se consideriamo un valore fisso di deformazione, A diviene costante, per cui si ottiene l'equazione di una retta su un diagramma bi logaritmico che correla la sollecitazione ed il tempo per un assegnato valore della deformazione.

Si è visto che dati sperimentali riportati su un diagramma log-log mostrano un ottimo accordo con la relazione bilogaritmica e possono, quindi, essere usati per ricavare le costanti introdotte nella relazione.

Questo consente, una volta definito il periodo di vita dell'apparecchiatura e la massima deformazione permessa, di ricavare la sollecitazione massima da applicare nel calcolo.

Altra relazione, largamente usata, che mette in relazione il tempo e la temperatura è la relazione di Larson-Miller [1]

$$LMP = T^*(C + \log t) \qquad (2)$$

LMP - parametro di Larson-Miller
T - temperatura (K)
t - tempo di rottura (hr)
C - costante (=20 per i metalli)

La relazione di Larson-Miller ci dice che il tempo di vita a rottura di un materiale, misurato ad uno specifico livello di sforzo, varierà con la temperatura in modo tale da lasciare costante questo parametro.

I criteri di estrapolazione che abbiamo visto, la relazione bilogaritmica e la relazione di Larson-Miller, consentono di prevedere il tempo di collasso dell'apparecchio dovuto allo scorrimento viscoso sulla base di dati sperimentali di laboratorio.

Questi criteri, tuttavia, sono basati sulla condizione di sollecitazione e temperatura costanti, condizione questa del tutto teorica che non rispecchia la reale vita dell'apparecchiatura, soggetta, durante il suo periodo di vita, a condizioni variabili sia di sollecitazione che di temperatura; di qui la necessità di definire dei criteri di calcolo che tengano conto anche di questo. Tra i vari criteri proposti quello più diffuso va sotto il nome di "frazione di vita" (life fraction):

$$\Sigma\, ti / tIi = 1 \qquad (3)$$

ti - tempo di vita speso durante il ciclo i
tIi - tempo di rottura per creep durante il ciclo i

Tutto quanto abbiamo visto finora è relativo a prove sperimentali che vengono condotte in laboratorio in condizioni estremamente controllate e con sollecitazioni e temperature fisse durante tutto il periodo della prova. Occorre, tuttavia, tenere presente che il fenomeno dello scorrimento viscoso è largamente influenzato anche da altri aspetti quali; le condizioni ambientali (atmosfera, irradiazione di neutroni etc.), le proprietà fisiche del materiale, eventuali deformazioni preesistenti del materiale stesso etc.

Tutto questo per indicare che, pur essendo fondamentali i criteri di estrapolazione dati visti finora, in quanto non è pensabile di fare test lunghi quanto la vita dell'apparecchio stesso, d'altra parte è essenziale usare dati sperimentali su tempi più lunghi possibile e condotti in ambienti che simulino quanto più possibile lo stato di servizio reale dell'impianto.

L'estrapolazione di dati di breve periodo su tempi molto lunghi è da assumere sempre con molta cautela.

2. LA NORMATIVA AMERICANA ASME VIII DIV.1 [2]

Salvo qualche riferimento marginale, la parola "Creep" non viene mai citata nel codice.

Le apparecchiature secondo ASME VIII div.1 vengono calcolate utilizzando direttamente le sollecitazioni ammissibili tabulate per ogni materiale nella raccolta ASME II - Part D.[3] La distinzione tra le sollecitazioni per temperature sotto o sopra la temperatura dove governa lo

scorrimento viscoso è indicata solo da un diverso carattere nella tabella (viene usato il carattere italico per indicare sollecitazioni in zona di creep).

L'ASME II - Part D fornisce, comunque, in Appendice 1, i criteri con cui vengono calcolate le sollecitazioni ammissibile per ASME VIII div.1.

$S \leq ST / 3.$	ST - carico di rottura
$S \leq SY / 1.5$	SY- carico di snervamento
$S \leq SRavg / 1.5$	SRavg- carico medio di rottura per creep a 100000 hr
$S \leq SRmin / 1.25$	SRmin- carico minimo di rottura per creep a 100000 hr
$S \leq SC$	SC- carico medio che provoca una velocità di scorrimento di 0.01% in 1000 hr

Nella zona di creep vengono, quindi, presi in considerazione: il carico medio di rottura a 100000 hr, il carico minimo di rottura a 100000 hr e la deformazione dello 0.01% in 1000 hr.

Ora, considerando che la banda di dispersione tra i valori medi e i valori minimi del carico di rottura a 100000 hr è del 20%, le sollecitazioni dovute al carico medio e al carico minimo sono pressochè simili, per cui, salvo casi in cui sia controllante la deformazione dello 0.01% in 1000 hr, possiamo dire che per il codice ASME VIII div.1 la sollecitazione ammissibile in zona di creep è data dal carico di rottura medio a 100000 hr diviso per 1.5.

Come ulteriore considerazione, sempre in Appendice 1 di ASME II - Part D viene detto in modo esplicito che i valori delle sollecitazioni sono basati sulle proprietà del materiale e nessuna considerazione viene fatta per ambienti corrosivi, per condizioni anomale di temperatura e di stress o per altre condizioni particolari.

Anche se la sollecitazione ammissibile in zona creep è calcolata in base alla rottura a 100000 hr, questo non implica assolutamente che ci sia nel codice una limitazione al periodo di vita dell'apparecchiatura.

Per quanto riguarda il calcolo a pressione esterna, sappiamo che il codice ASME VIII div.1 fa uso di carte per vuoto. Non si ha, comunque, nel codice, nessun riferimento all'uso di queste carte in zona di creep, ma si rimanda ad ASME II - Part D in Appendice 3, che fornisce i criteri con cui sono state sviluppate le carte per vuoto ed i limiti applicativi di queste carte.

Nel caso di alta temperatura si hanno le seguenti condizioni: nei limiti di temperatura riportati nelle singole carte, queste si possono usare anche in zona di creep. I margini sono ridotti, ma sono ancora adeguati per la progettazione.

Per temperature elevate occorre riferirsi alle ASME III Div.1 - Subsection NH, Appendix T, T-1500.[4]

Tuttavia, per temperature non superiori ai limiti riportati nelle Fig. 3-500.1 / 3-500.2 / 3-500.3 dell'Appendice 3 le carte ASME per vuoto possono essere ancora applicate.

La scelta da parte del codice ASME VIII div.1 di usare direttamente le sollecitazioni ammissibili fa si che il reperimento delle caratteristiche meccaniche in zona di creep sia estremamente difficile se non impossibile da ottenere. Le specifiche dei materiali, sia ASME che ASTM, riportano, infatti, solo le caratteristiche meccaniche a freddo.

Questo è un problema se si vogliono usare materiali ASME con altri codici, per esempio, il codice VSR, tant'è vero che per sopperire a questa mancanza la raccolta M [5], fino all'edizione del 1999, riportava delle schede tecniche dei materiali ASME ammessi all'impiego con le caratteristiche a caldo dei materiali.

A partire dall'edizione del 1999 la raccolta M, al paragrafo M.1.B.3.2.1.1. per il valore di $\sigma r,100000,t$ assume i valori delle sollecitazioni ASME in zona di creep riportati nella raccolta ASME II - Part D moltiplicati per 1.49. Questo può essere un indizio che la sollecitazione ammissibile in zona creep per ASME VIII div.1 è sostanzialmente uguale al carico di rottura a 100000 hr diviso per 1.5.

3. CONSIDERAZIONI SULLA NORMATIVA AMERICANA ASME VIII DIV1

L'ASME VIII div.1 non fa considerazioni specifiche riguardo al periodo di lavoro previsto, ai cicli di lavoro, ad ambienti operativi o eventuali condizioni particolari di esercizio.

Poiché esistono impianti operativi sicuramente da più di 100000 hr (circa 11 anni) senza mostrare problemi particolari di degrado della apparecchiature è importante capire quale sia

il fattore di sicurezza implicito nel codice; a tale scopo ricordiamo che i parametri fondamentali che influenzano il creep sono la temperatura e la sollecitazione.

Consideriamo un'apparecchiatura in materiale P235GH progettata a 450°C per 100000 hr.

Vediamo per prima l'influenza della temperatura.

Materiale: P235GH
Td = 450 °C = 723.15 °K
Top = 435 °C = 708.15 °K
t = 100000 hr

$LMP = 723.15*(20 + \log 100000) = 18078.75$

$t_{op} = 10^{(LMP/Top - 20)} = 338492 \text{ hr} \cong 38 \text{ anni}$

Normalmente la temperatura di progetto si assume dai 15 ai 25 °C superiore alla massima temperatura operativa. Assumendo un margine di 15 °C si ha una temperatura operativa di 435 °C. Se utilizziamo il parametro di Larson-Miller per estrapolare il tempo di rottura si vede che il solo margine di temperatura di 15 °C ha incrementato il tempo di vita da circa 11 anni a circa 38 anni.

Consideriamo, ora l'influenza della sollecitazione; per questo utilizziamo la relazione bilogaritmica.

Materiale: P235GH
Td = 450 °C
$\sigma 1 = 69$ Mpa a t1 = 100000 hr
$\sigma 2 = 57$ Mpa a t2 = 200000 hr

$tr = m*(\sigma)^{-n}$

$n = \log(t1/t2) / \log(\sigma 2/\sigma 1) = 3.628$
$\log(m) = \log(t2) + n*\log(\sigma 2) = 11.671 \Rightarrow m = 4.69e+11$

$\sigma = \sigma_{r,100000,t} / 1.5 = 69 / 1.5 = 46$

$tr = 4.69e+11 * 46^{-3.628} = 435440 \text{ hr} \cong 50 \text{ anni}$

Dai dati disponibili dalla specifica del materiale del carico di rottura per creep a 100000 e 200000 hr ricaviamo le costanti m ed n della relazione bilogaritmica.

Calcolando la sollecitazione ammissibile come $\sigma_{r,100000,t}$ / 1.5 si ottiene una sollecitazione di calcolo di 46 Mpa e con questa nuova sollecitazione si passa da 100000 hr a 435440 hr ovvero da circa 11 anni a circa 50 anni.

La conclusione di questa breve analisi è che i coefficienti di sicurezza adottati dal codice rendono la progettazione in zona di creep particolarmente conservativa. Ora, se da un lato questo rende l'apparecchiatura sicura, dall'altro lato non ha molto senso progettare per 50 anni un'apparecchiatura che deve durare 10 o 15 anni. C'è, quindi, lo spazio per un'analisi più articolata che riduca i coefficienti di sicurezza e consenta di avere apparecchiature meno pesanti, e, quindi, meno costose, pur senza rinunciare alla sicurezza dell'apparecchiatura stessa.

Questa filosofia è quella che viene applicata da codice Europeo EN 13445 che, essendo il codice più recente, affronta il problema dello scorrimento viscoso con una visuale più ampia e con l'adozione di metodi alternativi che consentono al progettista di adattare i calcoli in funzione delle esigenze specifiche del progetto.

4. LA NORMATIVA EUROPEA EN 13445 [6]

Il codice introduce i concetti di: vita dell'apparecchiatura, periodo, carico unico o multiplo e monitoraggio; viene, inoltre, fatta un'ulteriore distinzione tra pressione interna e pressione esterna.

Nel caso di carico unico senza monitoraggio, la sollecitazione ammissibile è data da:

$$f = \mathrm{Min}(f_{nc}; R_{m/T/t} / SFc; R_{p1.0/T/t}) \qquad (4)$$

dove:

f_{nc} - sollecitazione basata su dati indipendenti dal tempo
$R_{m/T/t}$ - carico medio di rottura alla temperatura T e periodo di vita t
$R_{p1.0/T/t}$ - carico medio di deformazione 1% alla temperatura T e periodo di vita t
SFc - fattore di sicurezza = 1.5

Se il periodo di vita t non è definito si assume pari a t = 100000 hr
Nel caso di carico unico con monitoraggio, la sollecitazione ammissibile è data da:

$$f = \mathrm{Min}(f_{nc}; R_{m/T/t} / SFc) \qquad (5)$$

dove:

f_{nc} - sollecitazione basata su dati indipendenti dal tempo
$R_{m/T/t}$ - carico medio di rottura alla temperatura T e periodo di vita t
SFc - fattore di sicurezza = 1.25

Le procedure di monitoraggio sono riportate in appendice M e prevedono: la definizione di un piano di ispezione, l'ispezione interna ed esterna dell'apparecchiatura da effettuare dopo un periodo non superiore al 50% del periodo di vita previsto, il prelievo di repliche morfologiche cavitazionali per il rilevamento di danni da creep.
Al di là del carico medio di deformazione all'1%, che non viene preso in considerazione nel caso di monitoraggio, la differenza sostanziale tra le due procedure, senza monitoraggio e con monitoraggio, è rappresentata dal fattore di sicurezza SFc che vale rispettivamente 1.5 e 1.25 il che porta, naturalmente, a spessori più bassi dell'apparecchiatura.
Per l'estrapolazione della sollecitazione fnc, sollecitazione indipendente dal tempo, si fa riferimento all'appendice S. Nelle formule per il calcolo della sollecitazione f, la sollecitazione f_{nc} va presa in considerazione solo se la differenza tra la temperatura di progetto e l'ultima temperatura alla quale sono disponibili le caratteristiche meccaniche, indipendenti dal tempo, nella specifica del materiale è minore o uguale a 200 °C. In questo caso, lo snervamento e la rottura del materiale devono essere estrapolati secondo i criteri riportati in appendice S.
Lo snervamento è:

$$R_p(T) = \min\left\{ R_p(T_H) \cdot \sqrt{\frac{T - T_L}{T_H - T_L} - \left(\frac{R_p(T_L)}{R_p(T_H)}\right)^2 \cdot \frac{T - T_H}{T_H - T_L}}; R_{p,4}(T) \right\} \qquad (6)$$

dove:

T_H - ultima temperatura alla quale è tabulato lo snervamento
T_L - temperatura più vicina nella tabella al valore 0.5^*T_H
$R_{p,4(T)}$ - carico derivante da una regressione su tutte le coppie di valori snervamento/ temperatura con una polinomiale di 4° grado

La rottura (solo per acciai austenitici con A ≥ 35%) è:

$$R_m(T) = R_m(T_{H\text{-}1}) + \frac{T - T_{H\text{-}1}}{T_H - T_{H\text{-}1}} \left[R_m(T_H) - R_m(T_{H\text{-}1}) \right] \qquad (7)$$

ove:

T_H - ultima temperatura alla quale è tabulato il carico di rottura

T_{H-1} - penultima temperatura alla quale è tabulato il carico di rottura

Una volta ricavati i dati di snervamento e rottura alla temperatura di progetto, la sollecitazione f_{nc} si calcola secondo i criteri standard definiti nel capitolo 6 di EN 13445.

Il codice poi fornisce i criteri di interpolazione sia riguardo alla temperatura e sia riguardo al periodo di vita. Per quanto riguarda $R_{m/T/t,}$ (carico medio di rottura alla temperatura t), l'interpolazione rispetto alla temperatura è data da:

per T_2-$T_1 \le 20$ °C

$$R_{m/T/t} = \frac{R_{m/T_1/t} \cdot (T_2 - T) + R_{m/T_2/t} \cdot (T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \qquad (8)$$

per T_2-$T_1 > 20$ °C

$$R_{m/T/t} = R_{m/T_1/t} \cdot \left(\frac{R_{m/T_2/t}}{R_{m/T_1/t}} \right)^{Z_R} \qquad (9)$$

dove: $Z_R = \dfrac{\lg T - \lg T_1}{\lg T_2 - \lg T_1}$ con: $\lg = \log_{10}$

essendo T1 eT2 le temperature rispettivamente minore e maggiore di T nella specifica del materiale.

Per l'interpolazione di $R_{p1.0/T/t}$ (carico medio di deformazione dell'1%,) sempre rispetto alla temperatura, valgono le seguenti formule:

per T_2-$T_1 \le 20$ °C

$$R_{p1,0/T/t} = \frac{R_{p1,0/T_1/t} \cdot (T_2 - T) + R_{p1,0/T_2/t} \cdot (T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \qquad (10)$$

per T_2-$T_1 > 20$ °C

$$R_{p1,0/T/t} = R_{p1,0/T_1/t} \cdot \left(\frac{R_{p1,0/T_2/t}}{R_{p1,0/T_1/t}} \right)^{Z_P} \qquad (11)$$

dove: $Z_P = \dfrac{\lg T - \lg T_1}{\lg T_2 - \lg T_1}$ con: $\lg = \log_{10}$

Essendo, come già visto nel caso precedente, T1 eT2 le temperature rispettivamente minore e maggiore di T nella specifica del materiale.

Il codice non consente estrapolazioni sulla temperatura, per cui il metodo di calcolo non si applica se la temperatura di progetto è superiore all'ultima temperatura tabulata nella specifica del materiale.

Infine per l'interpolazione $R_{m/T/t}$ (carico medio di rottura alla temperatura t) su periodo di vita si ha:

$$R_{m/T/t} = R_{m/T/t_A} \cdot \left(\frac{R_{m/T/t_B}}{R_{m/T/t_A}} \right)^{X_R} \qquad (12)$$

dove: $X_R = \dfrac{\lg t - \lg t_A}{\lg t_B - \lg t_A}$ con: $\lg = \log_{10}$

t_A,t_B - periodi di vita rispettivamente minore e maggiore del periodo di vita dato nella specifica del materiale

$R_{m/T/tA}$
$R_{m/T/tB}$ - carichi medi di rottura corrispondenti a t_A e t_B
La formula si applica anche a periodi di vita inferiori al minimo periodo tabulato; in questo caso per t_A e t_B si assumono i periodi di vita disponibili nella specifica del materiale.
Mentre per l'interpolazione $R_{1.0/T/t}$ (carico medio di deformazione dell'1%,) su periodo di vita si ha:

$$R_{p1.0/T/t} = R_{p1.0/T/t_A} \cdot \left(\frac{R_{p1.0/T/t_B}}{R_{p1.0/T/t_A}} \right)^{X_P} \qquad (13)$$

$$\text{dove: } X_P = \frac{\lg t - \lg t_A}{\lg t_B - \lg t_A} \qquad \text{con: } \lg = \log_{10}$$

t_A,t_B - periodi di vita rispettivamente minore e maggiore del periodo di vita dato nella specifica del materiale

$R_{1.0/T/tA}$
$R_{1.0/T/tB}$ - carichi medi di deformazione all'1% corrispondenti a t_A e t_B
Per periodi di vita inferiori al minimo periodo di vita tabulato il carico di deformazione all'1% non viene preso in considerazione nel calcolo della sollecitazione ammissibile.
Oltre ai criteri di interpolazione, il codice consente anche di estrapolare i dati su periodi di vita più lunghi rispetto a quelli riportati nella specifica del materiale.

$R_{m/T/t}$ i criteri sono riportati in appendice R
$R_{p1.0/T/t}$ si assume il valore corrispondente all'ultimo periodo di vita tabulato

Le formule riportate in appendice R sono equazioni di tipo polinomiale che combinano i metodi di estrapolazione sulla temperatura, tipo l'equazione di Larson-Miller, con i metodi di estrapolazione sulla sollecitazione, tipo l'equazione bilogaritmica, visti in precedenza all'inizio di questa presentazione.
La tabella R-2, sempre in appendice R, riporta le costanti delle polinomiali relative a 38 materiali.
Le limitazioni connesse all'uso di queste equazioni sono dovute al fatto che sono relative a specifici materiali per cui, se il materiale non è tra quelli riportati in appendice R, il metodo non può essere usato.
Inoltre, le equazioni sono valide solo nel range di temperature per le quali sono state ricavate e per periodi di vita non superiori al massimo valore tabulato nella specifica del materiale o nella fonte da cui sono stati presi i dati per ricavare le equazioni stesse.
Un ultimo fattore da tenere in considerazione, sia nel caso di carico con o senza monitoraggio è il fattore di riduzione dell'efficienza di saldatura (Zc).
Questo fattore assume i seguenti valori in funzione della procedura prevista in EN 13445-2:2002 Annex C

Zc = 1 - tutte le condizioni riportate in Annex C sono soddisfatte
Zc < 1 - le condizioni riportate in Annex non sono completamente soddisfatte
Zc = 0.8 - in tutti gli altri casi

Esaminiamo ora il caso dei carichi multipli, si può adottare una procedura semplificata oppure una procedura che tiene conto del danno cumulativo.
La procedura semplificata considera un unico ciclo con: temperatura massima tra le temperature di tutti i cicli e durata del ciclo pari alla somma delle durate di tutti i cicli.
La procedura basata sul danno cumulativo applica il criterio della frazione di vita (life fraction)

$$\Sigma \frac{ti}{tDi, fFi, Ti} \leq 1 \qquad (14)$$

ti - periodo di vita
$t_{Di,fFi,Ti}$ - tempo di rottura corrispondente al periodo ti

è una la procedura piuttosto complessa, per cui cercheremo di riportare qui i passi fondamentali:

1. Calcolo spessori apparecchio per la condizione di carico più gravosa
2. Per ogni componente
   - Per ogni ciclo, calcolo della massima sollecitazione in funzione dello spessore installato (fFi)
   - Per ogni ciclo, calcolo del tempo di rottura ammissibile (tDi,fFi,Ti)
   - Calcolo del danno cumulativo di creep su tutti i cicli

   Σ ti / tDi,fFi,Ti ≤ 1
3. Se la sommatoria è > 1 occorre aumentare lo spessore e ripetere il calcolo. Se la sommatoria e < 1 si può diminuire lo spessore e ripetere il calcolo

Si tratta di una procedura di ottimizzazione che potrebbe portare ad una diminuzione degli spessori con conseguenti economie costruttive.
Il lato negativo della procedura è costituito dalla sua estrema difficoltà di calcolo, dovuta sostanzialmente a due fattori

1. Difficoltà del calcolo della sollecitazione fFi in funzione dello spessore
2. Complessità del calcolo del tempo di danneggiamento ammissibile tD,fFi,Ti

Per quanto riguarda il punto 1., occorre tenere presente che in linea generale il codice di calcolo prevede il calcolo dello spessore in funzione della sollecitazione ammissibile. Ora, invertire questa procedura può essere semplice per alcune membrature, per esempio, le virole cilindriche a pressione interna, ma diviene molto più complessa per altre membrature quali i fondi ellittici o torosferici o la verifica della compensazione di un'apertura, per le quali difficilmente si riesce ad invertire le formule, con conseguente necessità di calcoli iterativi.
In altri casi, inoltre, la procedura può diventare addirittura impossibile nel caso di membrature più complesse, laddove più componenti interagiscono fra di loro come nel caso di accoppiamenti flangiati o piastre tubiere di scambiatori di calore.

Per quanto riguarda il punto 2., la difficoltà del calcolo è insita nella stessa procedura che prevede:

1. la costruzione del diagramma bilogaritmico sollecitazione/tempo di rottura e sollecitazione/tempo deformazione 1% alle varie temperature operative
2. il calcolo dei periodi tA e tB della specifica del materiale adiacenti al periodo corrispondente alla sollecitazione fFi
3. la lettura dei carichi di rottura relativi ai tempi tA e tB
4. il calcolo delle sollecitazioni ammissibili a tA e tB dai carichi di rottura e fattore di sicurezza (1.5 o 1.25 per processi non monitorati o monitorati).
5. il calcolo del periodo di danno tR,fFi,Ti nel ciclo, dovuto al carico di rottura a creep
6. per processi senza monitoraggio occorre ripetere la procedura ai punti 3, 4, 5 anche per il tempo di deformazione all'1% e ricavare il periodo di danno tP,fFi,Ti
7. il calcolo del periodo di danneggiamento nel periodo tDi,fFi,Ti = min(tR,fFi,Ti; tP,fFi,Ti)

Ulteriori complicazioni sorgono nel caso in cui il periodo t risulta esterno ai limiti tA e tB dei periodi tabulati sulla specifica del materiale. In questo caso vengono forniti criteri di estrapolazione che rendono il calcolo, se possibile, ancora più complicato.
In conclusione, se alla difficoltà di calcolo della procedura appena vista aggiungiamo altre difficoltà di carattere operativo quali:

1. la mancanza dei dati sui cicli in fase di progettazione
2. i tempi sempre più ridotti di progettazione

la procedura proposta, secondo la mia personale opinione, resta solo un esercizio intellettuale senza pratica applicazione.

5. CALCOLO DI DUE REATTORI SECONDO EN 13445

A conclusione di questa analisi ci è sembrato utile verificare in pratica le differenze tra i vari criteri di calcolo, abbiamo, quindi, calcolato due reattori a differenti condizioni di progetto i cui risultati sono sinteticamente riportati nella tabella seguente:

	Reattore 1	Reattore 2
Materiale	2 1/4Cr-1Mo	1 1/4Cr-1/2Mo
Temperatura	566 °C	490°C
Pressione	4 Bar	46.5 Bar
ASME VIII div1		
Peso a vuoto		109 ton
EN 13445		
Peso a vuoto		
Senza monitor.	76 ton	104 ton
Con monitor.	66 ton	86 ton
	---	---
differenza	10 ton	18 ton
%	13%	17%

Dal raffronto ASME VIII div1 – EN 13445 senza monitoraggio, effettuato solo nel secondo reattore, appare non esserci sostanziale differenza in termini di spessore e quindi peso/costi mentre interessante appare raffrontare le due diverse possibilità monitoraggio/senza monitoraggio del codice europeo. Nel primo reattore è stata calcolata una differenza percentuale, tra monitoraggio e senza monitoraggio del 13% in peso, mentre per il reattore 2, la possibilità di effettuare il monitoraggio, da un risparmio in peso che passa al 18% risultante dal fatto che questo lavora ad una pressione 10 volte più alta ed ha spessori nettamente superiori a quelli del primo reattore.

A livello indicativo il costo di un materiale basso legato è oggi di circa 2 euro/kg per cui, grossolanamente, si può ipotizzare un risparmio sul materiale rispettivamente di 20000,00 e 36000,00 euro per il primo ed il secondo reattore.

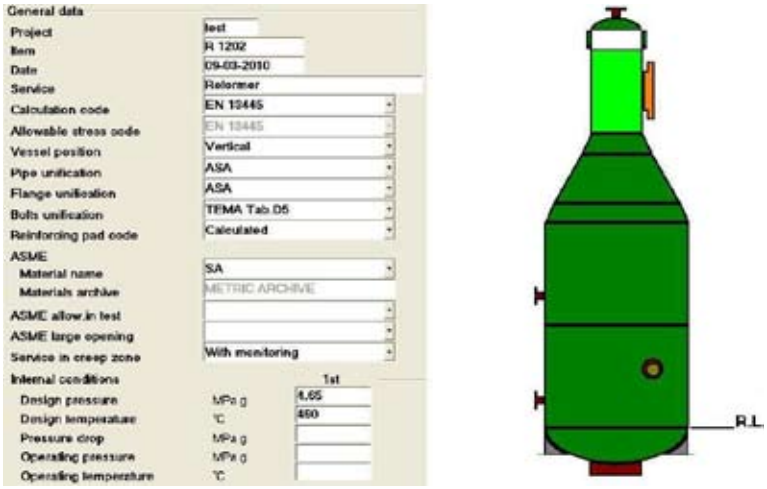


Figura 1 Reattore n°2 software di calcolo MT-Mech [7]

Naturalmente per un apparecchio più leggero si hanno risparmi anche a livello costruttivo, per il trasporto ed il montaggio etc., e, quindi, il risparmio finale può essere molto più consistente.

D'altro canto, la procedura di monitoraggio dell'apparecchio nel suo periodo di vita comporta sicuramente dei costi addizionali per cui occorre fare un bilancio tra costi e benefici nelle due alternative per poter decidere la soluzione migliore.

6. CONCLUSIONI

Abbiamo visto brevemente come i due diversi codici affrontano un tema complesso quale la progettazione in regime di scorrimento viscoso. L'ASME VIII div1 effettua una procedura semplificata ma non esaustiva; infatti il codice rimanda la progettazione alla scelta di un opportuno valore della sollecitazione ammissibile senza far considerazioni specifiche riguardo il periodo di lavoro, i cicli di lavoro, gli ambienti operativi o eventuali condizioni particolari di esercizio, questo per poi adottare fattori di sicurezza conservativi che vanno a discapito del peso e del costo dell'apparecchio. Il codice europeo EN 13445, di formulazione ed impostazione più recente, da gli strumenti necessari al progettista per valutare soluzioni alternative che possano tener conto anche delle problematiche di cui sopra, anche se non sempre con procedure di calcolo di facile attuazione, come nel caso del calcolo del danno cumulativo. Inoltre tra i casi presi in esame vi è la possibilità di considerare o meno la presenza del monitoraggio dando una ulteriore possibilità di scelta per realizzare una migliore ed economicamente vantaggiosa progettazione.

BIBLIOGRAFIA

[1] Raccomandazioni CTI R5, Raccomandazioni del Comitato Termotecnico Italiano per la valutazione della vita residua (VVR) di componenti in regime di scorrimento viscoso 2005

[2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, sect. VIII Rules for Construction of Pressure Vessels div1,. 2007 add. 2009

[3] ASME Boiler and Presure Vessel Code, sect II Materials, 2007 add.2009

[4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, sect III Rules for Construction of Nuclear Facility Components div1

[5] ISPESL VSR Raccolta M , 1999

[6] EN 13445 Unfired Pressure Vessels, 2002 updated 2009

[7] MT-Mech rel.3.4.0 - User's Guide , Microtechno Snc.2010

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

Procedure di calcolo numerico per l'analisi strutturale di componenti in creep basate sulla definizione della "reference stress"

S. Pagano - G.L. Cosso**
**Istituto Italiano della Saldatura*

ABSTRACT

Nell'ambito dell'analisi strutturale la stima della vita teorica di un componente in esercizio in regime di scorrimento viscoso può essere condotta seguendo un approccio tradizionale, sulla base delle procedure "by formula" proposte dalle normative di progetto. L'adozione del metodo ad elementi finiti con analisi elastica lineare richiede l'attenta interpretazione, non sempre agevole, della natura delle tensioni agenti (primarie, secondarie, non lineari). L'impiego dell'analisi elastoplastica non lineare consente invece una stima più immediata delle tensioni effettivamente agenti sugli elementi strutturali quando i fenomeni di rilassamento indotti dal creep hanno già avuto luogo. In quest'ambito è possibile l'applicazione delle procedure di calcolo proposte dalle recenti normative e raccomandazioni che regolano la progettazione e l'esercizio di apparecchiature a pressione (UNI EN 13445, R5), adottando un legame costitutivo elastoplastico e valutando una tensione di riferimento da impiegare nel calcolo del tempo teorico di rottura.

Tale approccio può essere applicato anche nella fase di progettazione di componenti operanti in regime di creep.

Nel presente lavoro vengono sinteticamente discussi i criteri proposti dalle normative sopra citate, illustrando un esempio applicativo nell'ambito della valutazione di vita residua di un'apparecchiatura in esercizio in un impianto petrolchimico.

1. LA "TENSIONE DI RIFERIMENTO"

Nell'ambito della progettazione di apparecchi in pressione le principali norme nazionali ed internazionali prevedono da tempo criteri per l'interpretazione dei risultati ottenuti da analisi numeriche ad elementi finiti. L'approccio "design by analysis" è infatti di notevole utilità in tutti i casi in cui occorre superare le limitazioni delle tradizionali procedure "by formula": quando è necessario, ad esempio, verificare la resistenza di componenti di geometria particolare e/o considerare l'interazione tra tensioni di natura primaria (determinate dai carichi meccanici) e tensioni di natura secondaria (correlate alla congruenza delle deformazioni). L'evoluzione dei software ad elementi finiti e il costante incremento delle prestazioni dei calcolatori hanno poi contribuito a rendere sempre più agevole e diffuso l'utilizzo dell'analisi numerica.

Fino a pochi anni fa, tuttavia, l'applicazione dell'approccio "design by analysis" era possibile solamente per componenti progettati per temperature massime di esercizio inferiori al limite convenzionale di inizio scorrimento viscoso. Questa importante limitazione è stata recentemente superata, sia pure con modalità differenti, dai principali riferimenti normativi del settore: la EN 13445 e il codice ASME.

Lo stato di tensione determinato dall'analisi numerica lineare elastica è in generale caratterizzato da significativi effetti di concentrazione, tipicamente in corrispondenza di discontinuità geometriche. In tali zone l'interpretazione della natura delle tensioni agenti è spesso complessa: agli effetti primari, di norma di carattere locale, si sovrappongono infatti significativi contributi secondari.

Le deformazioni indotte dallo scorrimento viscoso, maggiormente pronunciate nelle zone di concentrazione di tensione, determinano una progressiva attenuazione degli effetti locali e secondari, promuovendo la ridistribuzione delle tensioni stesse. Questa fase transitoria iniziale termina con il raggiungimento di una condizione "stazionaria" ("steady state"): nelle fasi successive lo stato di tensione non manifesta ulteriori variazioni, nonostante il continuo incremento delle deformazioni viscose (anelastiche).

L'evoluzione dello stato di tensione determinata dallo scorrimento viscoso presenta evidenti analogie con la ridistribuzione delle tensioni indotta dal legame costitutivo elastoplastico. È peraltro immediato osservare (Figura 1) che il valore delle tensioni agenti nello "steady state" è con buona approssimazione indipendente dal legame costitutivo scelto per rappresentare lo scorrimento viscoso, che ha influenza solamente sulle deformazioni. Il valore massimo della tensione equivalente di Von Mises che si manifesta nello "steady state" è pertanto paragonabile (Figura 2) al carico unitario di snervamento di una legge costitutiva elastica – perfettamente plastica adottata in un'analisi numerica non lineare.

Da tali considerazioni ha origine il concetto di "tensione di riferimento" ("reference stress"), ormai da tempo utilizzato nella letteratura tecnica e nei riferimenti normativi inerenti lo scorrimento viscoso ([1], [2], [3]).

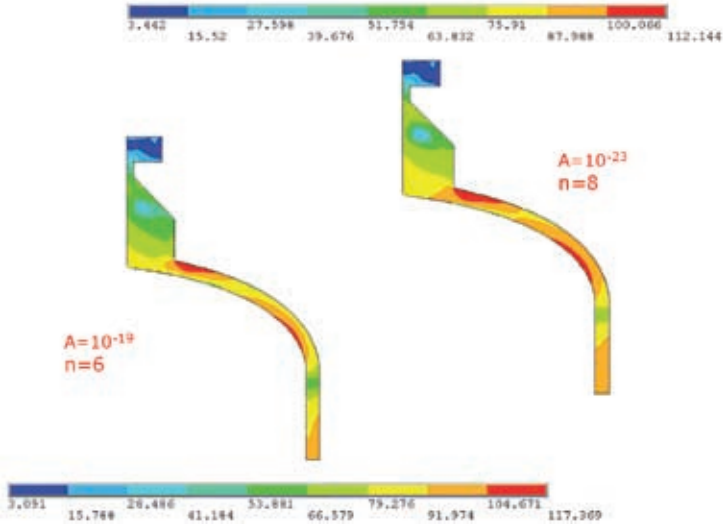


Fig. 1 – Distribuzione della tensione equivalente di Von Mises (MPa) che caratterizza le condizioni di "steady state" per due differenti leggi costitutive (in entrambi i casi è stato utilizzato il modello di Norton: $\partial\varepsilon/\partial t = A\sigma^n$)

Considerate le definizioni seguenti:

- P_d: combinazione dei carichi meccanici nelle condizioni di progetto;
- σ_y: carico unitario di snervamento del materiale (caratterizzato da una legge costitutiva elastica – perfettamente plastica);
- P_{lim}: combinazione dei carichi meccanici, proporzionale a P_d, che determina il collasso plastico del componente

il valore della tensione di riferimento è definito dall'equazione:

$$\sigma_{ref} = P_d \sigma_y / P_{lim} \qquad (1)$$

in cui il rapporto σ_y/P_{lim} è con ottima approssimazione indipendente da σ_y. La tensione di riferimento ottenuta da (1) può di conseguenza essere confrontata sia con il carico unitario di snervamento del materiale, nella verifica della resistenza del componente nei confronti del collasso plastico, sia con la resistenza del materiale stesso nei confronti dello scorrimento viscoso, nei casi in cui sia quest'ultimo fenomeno a condizionare il dimensionamento.

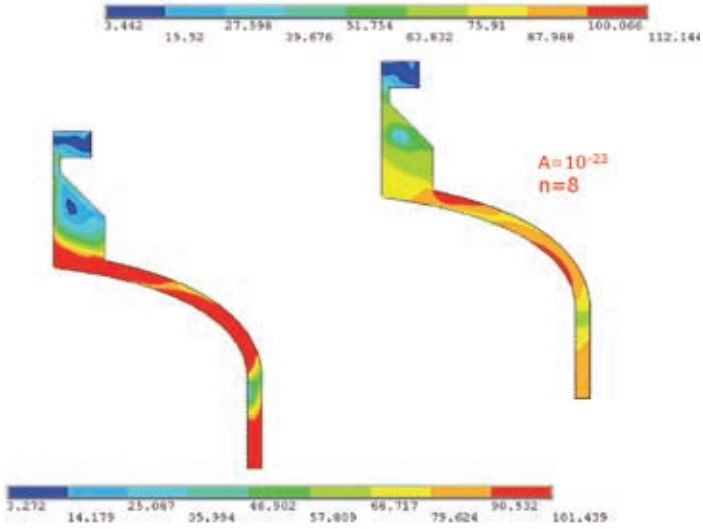


Fig. 2 – Confronto tra una delle distribuzioni in Fig. 1 (a destra) e la distribuzione della tensione equivalente di Von Mises (a sinistra) ottenuta con una legge costitutiva elastica – perfettamente plastica, con carico unitario di snervamento pari a 100 MPa

2. LA FASE TRANSITORIA CHE PRECEDE LO "STEADY STATE"

Nel periodo di esercizio che precede lo "steady state", come descritto nel paragrafo precedente, hanno luogo le deformazioni viscose che determinano la ridistribuzione delle tensioni agenti. Questa fase costituisce pertanto un contributo, in generale non trascurabile, al danneggiamento del componente per scorrimento viscoso.

In alcuni componenti la fase transitoria può manifestarsi ad ogni ciclo operativo di arresto/avviamento. Questa circostanza si verifica quando, per effetto delle condizioni di congruenza, durante la fase di arresto le deformazioni viscose determinate durante l'esercizio inducono fenomeni di plasticizzazione locale (Figura 3). Al successivo avviamento, lo stato di tensione che ne consegue viene riportato allo "steady state" con una nuova fase transitoria. In tali condizioni ogni ciclo determina un contributo al danneggiamento viscoso di entità simile a quello corrispondente alla fase iniziale dell'esercizio.



Fig. 3 – Evoluzione qualitativa dello stato di tensione e deformazione di un componente in esercizio in regime di scorrimento viscoso

Una stima accurata di tali effetti è tutt'altro che agevole. Occorrerebbe infatti un modello matematico estremamente dettagliato della resistenza e del comportamento costitutivo del materiale, in differenti condizioni di tensione agente e temperatura di esercizio: un approccio eccessivamente oneroso per l'applicazione in ambito industriale. I principali riferimenti normativi, pertanto, propongono criteri semplificati:

- per valutare il contributo al danneggiamento della fase transitoria iniziale, modificando opportunamente il valore della tensione di riferimento;
- per verificare le condizioni di "shakedown" durante i cicli di arresto/avviamento.

3. CODICE ASME E EN 13445: LE IMPORTANTI INNOVAZIONI DELL'EDIZIONE 2007

Nell'edizione 2007 del codice ASME è stata completamente rinnovata la Divisione 2 della Sezione VIII, nella quale sono riportate le prescrizioni per l'impiego dell'analisi strutturale numerica. È stata notevolmente ampliata ed approfondita, in particolare, la descrizione dei criteri per l'impiego dell'analisi non lineare (limite ed elastoplastica); i valori dei coefficienti di sicurezza sono stati allineati a quelli già da tempo indicati dalla EN 13345 (si veda la Tabella 1 seguente); la possibilità di utilizzare le procedure di verifica della Divisione 2 è stata estesa anche al progetto di componenti in esercizio in regime di scorrimento viscoso. In quest'ambito, tuttavia, l'applicazione dei software ad elementi finiti è limitata all'analisi elastica lineare, in cui è necessaria l'interpretazione dei risultati con la procedura di categorizzazione dello stato di tensione.

Con le Addenda 2007 anche la norma EN 13445 introduce la possibilità di adottare l'analisi strutturale numerica per la progettazione di componenti in esercizio in regime di scorrimento viscoso (Annex B "Design By Analysis – Direct Route"). A differenza del codice ASME viene ammesso, in quest'ambito, l'impiego dell'analisi non lineare (analisi limite). Le procedure di calcolo, sostanzialmente analoghe a quelle indicate in R5, prevedono l'esecuzione di due differenti verifiche:

- "Creep Rupture" (CR): esamina la resistenza delle membrature nei confronti delle azioni meccaniche; prevede l'impiego dell'analisi non lineare elastica – perfettamente plastica (con l'utilizzo del criterio di Von Mises) in cui il carico unitario di snervamento viene posto pari alla resistenza di progetto del materiale. Quest'ultima viene calcolata (con l'adozione di un opportuno coefficiente di sicurezza) sulla base della resistenza media a rottura per scorrimento viscoso relativa ad un periodo di esercizio commisurato alla vita di progetto, in ogni caso non inferiore a 100˙000 h;
- "Excessive Creep Strain" (ECS): considera l'eventualità che durante la vita di progetto le deformazioni permanenti possano superare, anche localmente, la duttilità a creep del materiale. La verifica comprende, mediante una procedura semplificata, la stima del contributo al danneggiamento determinato dalla fase transitoria iniziale: il peso di tali effetti è tanto più significativo quanto maggiore è l'entità delle concentrazioni di tensione rilevate dall'analisi elastica lineare.

Materiale	Per $T < T_{amb}$		Per $T \geq T_{amb}$			
	Rottura a trazione	Carico di snervamento	Rottura a trazione	Carico di snervamento	Tensione di rottura	Incremento deformazione a creep
Acciai ferritici	$R_m/2.4$	$f_y/1.5$	$R_m/2.4$	$f_{yT}/1.5$	$\text{Min}(\sigma_{Rmed/100000}/1.5, 0.8\sigma_{Rmin/100000})$	$\sigma_{med/0.01\%\ 1000h}$
Acciai austenitici	$R_m/2.4$	$f_y/1.5$	$R_m/2.4$	$\text{Min}(f_y/1.5, 0.9f_{yT})$	$\text{Min}(\sigma_{Rmed/100000}/1.5, 0.8\sigma_{Rmin/100000})$	$\sigma_{med/0.01\%\ 1000h}$

Tabella 1 – Criteri per la definizione della tensione ammissibile per l'utilizzo delle prescrizioni della Sez. VIII Div. 2 del codice ASME (Edizione 2007)

Deve essere infine verificata l'assenza di deformazioni plastiche ("shakedown") indotte dalle condizioni di congruenza durante le fasi transitorie, come descritto in dettaglio nel paragrafo precedente.

È di notevole importanza segnalare che, nel contesto dell'analisi numerica, la presenza di giunzioni saldate deve essere opportunamente considerata mediante l'adozione di opportuni fattori di riduzione della resistenza a creep (Par. B.9.2 "Welded joints"). Per quanto tale aspetto non rappresenti l'oggetto principale del presente lavoro, deve essere sottolineato che l'accurata caratterizzazione del comportamento delle giunzioni saldate nei confronti dello scorrimento viscoso rappresenta ad oggi una tematica tutt'altro che evasa, in particolare per i materiali di impiego più recente.

4. L'APPLICAZIONE DELLE PRESCRIZIONI DELLA NORMA EN 13445 PER LA STIMA DELLA FRAZIONE DI VITA CONSUMATA DI COMPONENTI IN ESERCIZIO IN REGIME DI SCORRIMENTO VISCOSO

Oltre a costituire un'opzione alternativa all'approccio "design by formula" nella fase di progetto, le prescrizioni della norma EN 13445 per l'utilizzo dell'analisi numerica possono essere adottate anche nell'ambito della riomologazione di apparecchiature in esercizio in regime di scorrimento viscoso ai sensi della Circolare ISPESL n° 48/2003, che rappresenta attualmente il riferimento vigente, nel nostro Paese, per l'esame di componenti che hanno totalizzato un periodo di servizio superiore alla vita di progetto (tipicamente 100˙000 h). L'opportunità di utilizzare l'analisi numerica in tale contesto è in generale correlata:

- alla necessità di effettuare una stima più accurata della frazione di vita consumata nei casi in cui le procedure "by analysis" normalmente impiegate conducano a risultati eccessivamente cautelativi, non congruenti con l'esito delle attività di ispezione (controlli non distruttivi ed indagini metallografiche);
- alla necessità di esaminare componenti di geometria complessa, per i quali le procedure "by formula" sono a rigore non applicabili e/o non consentono di ottenere una rappresentazione completa ed esauriente delle sollecitazioni agenti.

Nel seguito viene sinteticamente proposta la descrizione di un esempio applicativo, in cui l'adozione dell'approccio "design by analysis" è stata ritenuta necessaria in relazione alla particolare geometria dei componenti in esame. La zona considerata è costituita dalla "plenum chamber" di un reattore FCC, nel caso in esame realizzata con la soluzione costruttiva rappresentata in Figura 4. Si tratta di un caso di particolare interesse, dal momento che, con tutta evidenza, il fasciame cilindrico induce sul fondo emisferico intermedio tensioni di natura primaria localizzate in prossimità della zona di connessione, che è senza dubbio arduo stimare con procedure "by formula". Anche l'analisi elastica lineare può, in questo caso, dare adito ad interpretazioni non univoche dei risultati ottenuti, dal momento che non è certamente immediato individuare correttamente la natura delle sollecitazioni agenti (Figura 5).

Come noto, la procedura indicata dalla Circolare ISPESL n° 48/2003 per la stima della frazione di vita consumata prevede il calcolo della sollecitazione agente sul componente in esame nelle condizioni di esercizio dichiarate dall'Esercente. Nel caso in cui a tale scopo sia impiegata l'analisi non lineare elastica -perfettamente plastica, tale valore è rappresentato dalla tensione di riferimento definita dall'equazione (1), opportunamente modificata per considerare il contributo al danneggiamento per creep della fase transitoria che precede lo "steady state". È di conseguenza possibile utilizzare l'equazione (B.9-2) proposta da EN 13445 per la verifica ECS, di seguito riprodotta:

$$\sigma_{ref} = [1+0.13(A_u/A_e-1)]A_d RM_d/A_u \qquad (2)$$

in cui:

- RM_d rappresenta la resistenza di progetto del materiale (definita sulla base della resistenza allo scorrimento viscoso);
- A_d rappresenta la combinazione di carico di progetto;

- A_u rappresenta la combinazione di carico, proporzionale ad A_d, che corrisponde al collasso plastico del componente. A_u viene calcolata rappresentando il comportamento del materiale mediante una legge costitutiva elastica-perfettamente plastica, in cui il carico unitario di snervamento è rappresentato da RM_d;
- A_e rappresenta la combinazione di carico, proporzionale ad A_d, che corrisponde, in un'analisi elastica lineare, al raggiungimento di un valore massimo della tensione strutturale pari a RM_d.

Nell'esempio applicativo proposto, la combinazione di carico "A" è costituita dalla sola pressione interna "P"; di conseguenza l'equazione (2) è stata modificata come segue:

$$\sigma_{ref} = [1+0.13(P_u/P_e-1)]P_{es}\sigma_y/P_{uu} \qquad (3)$$

in cui P_{es} è la pressione massima di esercizio dichiarata dall'esercente e σ_y rappresenta un valore arbitrariamente scelto per il carico unitario di snervamento. P_u e P_e vengono calcolate, con le modalità descritte, sulla base di σ_y; come già notato, infatti, il rapporto σ_y/P_u è con ottima approssimazione indipendente da σ_y, così come, per ovvia conseguenza, il rapporto P_u/P_e. Nel caso in esame i dati utilizzati per il calcolo di σ_{ref} sono sintetizzati in Tabella 2. In Figura 6 è rappresentata la distribuzione della tensione e della deformazione equivalente di Von Mises corrispondenti alla pressione P_u; in Figura 7 sono infine riportate la "Master Curve" e la curva isoterma bilogaritmica tensione – tempo utilizzate per la stima del tempo teorico a rottura.

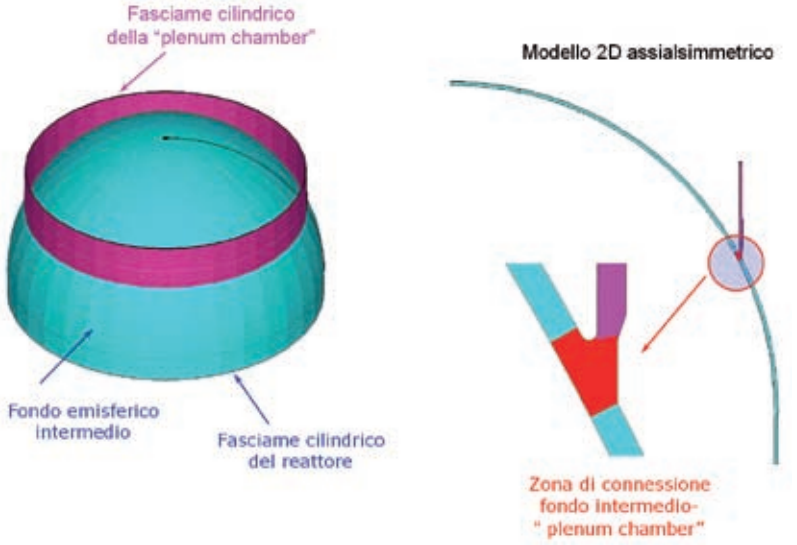


Fig. 4 – Zona di connessione del fasciame cilindrico del reattore con il fondo emisferico intermedio e la "plenum chamber"

P_{es} [MPa]	σ_y [MPa]	P_u [MPa]	P_e (1) [MPa]	σ_{ref} [MPa]	σ_{ref}/C_r (2) [MPa]	T_{es} [°C]	t_R (3) [h]
0.25	50	0.437	0.196	33.18	36.87	513	10^6

(1) Valore calcolato sulla base della distribuzione linearizzata della tensione equivalente di Von Mises illustrata in Figura 5.
(2) Valore della tensione di riferimento incrementato mediante il coefficiente di riduzione della resistenza a scorrimento viscoso per i giunti saldati C_r (assunto pari a 0.9 come previsto dalla Circolare ISPESL n° 48/2003).
(3) Tempo teorico a rottura stimato superiore a 10^6 h (si veda la Figura 7).

Tabella 2 – Dati impiegati per la determinazione della tensione di riferimento

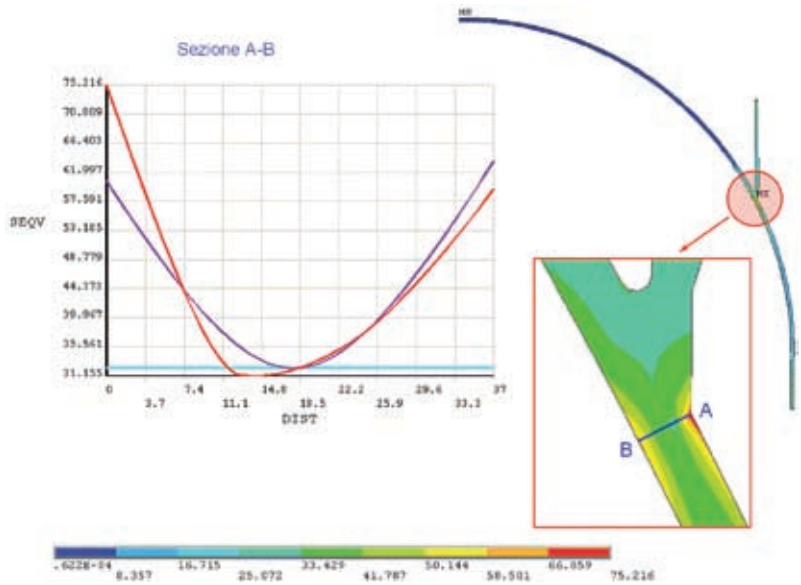


Fig. 5 – Distribuzione della tensione ideale di Von Mises (in MPa) ottenuta dall'analisi elastica lineare in condizioni di esercizio. In alto a sinistra è rappresentata la distribuzione linearizzata della tensione in corrispondenza della sezione A-B (la componente di membrana è indicata in azzurro, la componente di membrana+flessione in violetto, la tensione effettiva in rosso)

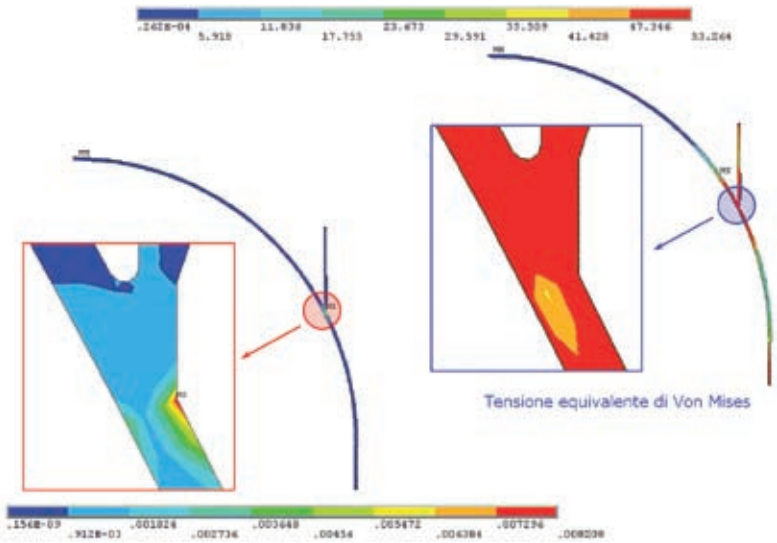


Fig. 6 – Distribuzione della tensione (in MPa) e della deformazione equivalente di Von Mises in corrispondenza della pressione P_u

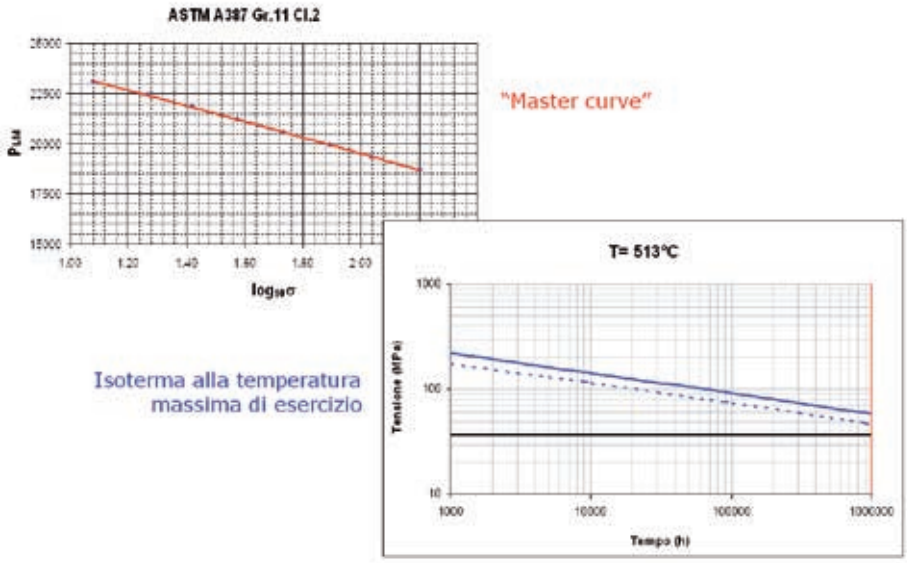


Fig. 7 – "Master Curve" e curva isoterma bilogaritmica tensione – tempo

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nelle due principali norme (EN 13445 e Codice ASME) per la progettazione e la fabbricazione di apparecchi in pressione è stata recentemente introdotta un'importante innovazione: la definizione di prescrizioni e procedure per l'utilizzo dell'analisi strutturale numerica ad elementi finiti anche nell'ambito dell'esercizio in regime di scorrimento viscoso ad alta temperatura. Questo passo riconosce evidentemente le potenzialità e l'importanza di uno strumento di calcolo ormai familiare e diffuso, già da tempo largamente utilizzato nell'ambito della sperimentazione e della ricerca.

La possibilità di utilizzare l'analisi non lineare, prevista dalla norma EN 13445, rende l'utilizzo dell'approccio "design by analysis" concettualmente semplice, oggettivo e immediatamente fruibile, riducendo gli oneri ed i rischi di "personalizzazione" tipicamente correlati all'interpretazione dei risultati ottenuti dall'analisi lineare elastica.

Le prescrizioni della norma EN 13445 rappresentano infine una guida per l'adozione dell'analisi numerica anche nell'ambito della riomologazione di apparecchiature in esercizio in regime di scorrimento viscoso ai sensi della Circolare ISPESL n° 48/2003. In tale contesto l'utilizzo delle tecniche di calcolo ad elementi finiti rappresenta uno strumento prezioso per valutare con accuratezza e approfondimento le condizioni di sollecitazione effettivamente agenti, in tutti i casi in cui l'approccio "by formula" evidenzia oggettive limitazioni.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] British Energy R5 "Assessment procedure for the high temperature response of structures"

[2] EN 13445-3:2009 "Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 3: Progettazione"

[3] BS 7910:2005 "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures"

[4] Circolare ISPESL N. 48/2003 "Procedura tecnica su: Verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale"

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

Interventi di riparazione su colonne. Confronto esito calcolo strutturale analitico e agli elementi finiti

*A. Iacino**
*F. Giacobbe***

** Studio di Ingegneria Antonino Iacino*
*** Dip. ISPESL Messina*

1. SOMMARIO

Nei casi in cui l'Utilizzatore intende eseguire interventi di riparazione su grandi colonne direttamente in campo, lasciando installata in loco l'attrezzatura a pressione, possono in taluni casi generarsi delle condizioni di indebolimento strutturale momentanee, che vanno accuratamente valutate.

Possibili esempi reali sono la sostituzione di interi tratti di virole del mantello, oppure l'esecuzione di un trattamento termico localizzato sullo stesso.

In entrambi i casi si viene a determinare un indebolimento della sezione interessata, la cui resistenza a pesi e carichi esterni (es. pressione del vento, peso proprio della parte sovrastante, tubazioni appese, passerelle ecc.) deve essere valutata congruamente, in maniera da prevenire in corso d'opera deformazioni sulle membrature e verificare la stabilità dell'attrezzatura al fine di salvaguardare la sicurezza degli operatori.

Nella presente memoria si illustrano due casi notevoli di riparazioni eseguite presso due raffinerie in Sicilia, nel corso del 2009, dove in entrambi i casi le colonne non sono state rimosse dalla loro posizione in campo.

La stabilità durante le fasi più critiche degli interventi è stata valutata con metodo agli elementi finiti, ma anche con calcoli convenzionali che, pur dimostrandosi insufficienti per un'analisi rispondente dei sistemi, sono invece insostituibili per avvalorare i risultati dell'analisi FEM.

2. FEM NELL'AMBITO DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

Nella fase di design strutturale di un componente in pressione il progettista riceve come input un "data sheet" meccanico che include tutti i dati e le specifiche del processo (es. tipologia del fluido, max temperatura, max pressione, connessioni, ecc.) e il suo compito è quello di dimensionare le membrature in pressione. Per farlo vengono utilizzati codici di calcolo che variano in funzione del Paese di destinazione. Tra i più importanti si ricordano raccolta Ispesl VSR o VSG con commenti CTI (Italia), Asme VIII Div. 1 e Div. 2 [16] (Usa), Stoomwezen (Olanda), WRC Bulletin 107/297 (Usa), PD 5500 (Regno Unito), AD 2000 (Germania), Codap (Francia), Swedish Pressure Vessel Code (Svezia), Tbk (Norvegia), Gost (Russia), JIS (Giappone), AS 1210 (Australia) e, nell'ambito europeo della direttiva PED, si cita il codice armonizzato EN-13445 [15].

La progettazione di apparecchi in pressione con metodi di calcolo teorico-analitico (metodo DBF - design by formula) è oggigiorno ben consolidata ma, accanto a tale metodo di calcolo, si sta affermando l'analisi agli elementi finiti (metodo DBA – design by analysis), con cui è possibile studiare particolari costruttivi complessi non risolvibili.

La teoria classica di scienze delle costruzioni e costruzione di macchine forniscono gli strumenti e le linee guida essenziali per eseguire correttamente il dimensionamento di un appa-

recchio in pressione. Le espressioni di calcolo prescritte dai vari codici, pur presentando delle diversità tra loro, hanno comune origine e fondamento nelle stesse relazioni teoriche, che sviluppano e affinano sulla base di specifici studi e differenti coefficienti di sicurezza.

Nel presente lavoro ci si sofferma sui principali passi che caratterizzano la progettazione meccanica di una colonna di un impianto petrolchimico ed in particolare il dimensionamento a codice e la verifica con il metodo agli elementi finiti (FEM), realizzata con un adeguato programma di calcolo, la quale permette una analisi puntuale delle zone più critiche e dei dettagli costruttivi non coperti da formula. Ad oggi il FEM rappresenta attualmente lo strumento di calcolo più potente a disposizione nel campo dell'analisi strutturale.

Fin dagli ultimi anni '70 sono stati elaborati diversi programmi software di calcolo strutturale agli elementi finiti che davano la possibilità di indagare lo stato di sollecitazione e di deformazione in prossimità ad elementi caratteristici della struttura. L'evoluzione della tecnica di questi programmi fu molto rapida, mostrando sempre una grande affidabilità dei risultati a fronte di input precisi e interpretazioni corrette dei fenomeni fisici.

L'acronimo FEM deriva dall'inglese Finite Element Method, mentre con l'acronimo FEA dall'inglese Finite Element Analysis ci si riferisce propriamente all'analisi agli elementi finiti.

Attualmente il calcolo FEM è affiancato anche dalla modellazione 3D in modo da importare fedelmente geometrie disegnate con autocad (esempi di formati: DXF, DWG, IGES, ACIS, STEP, DXB, DWF e SVG).

Il mercato per il settore della progettazione meccanica offre molte soluzioni più o meno specifiche e finalizzate per le apparecchiature a pressione; è possibile citare a titolo di esempio i seguenti applicativi.

open source		commerciali		
• CALCULIX • CAELINUX • ASTER • DEAL.II • DUNE • Z88_FEM • SUNDANCE • SLFFEA • PETSCFEM	• FENICS PROJECT • FELT • FREEFEM.ORG FREEFEM • GETDP • IMPACT • ELMER FEM SOLVER • OOFEM	• PROSAP • ALGOR • ANSYS • LUSAS • NASTRAN • LS-DYNA • STRAUS • FE-PIPE • MORFEO	• NISA • PAM • ABAQUS • PERMAS • RADIOSS • RANGE • SAP2000 • SYSTUS • SYSWELD	• COSMOS • DLUBAL • ESI • EUROPLEXUS • CASTEM CAST3M • FEMAP • GTSTRUDL30 • MAESTRO

Tabella 1 – Esempi di applicativi software per il calcolo strutturale agli elementi finiti

Nel presente studio è stato utilizzato l'applicativo FE-PIPE della PRG che è specifico e finalizzato per lo studio di apparecchiature a pressione.

2.1. Aspetti Fondamentali del FEM

L'idea centrale del metodo è quella di suddividere idealmente la struttura in un numero di sottostrutture più piccole chiamate elementi; ciascun elemento viene poi modellato per quanto riguarda gli spostamenti, tramite opportune funzioni dette "di forma" che interpolano i valori degli spostamenti assunti in opportuni punti detti nodi (estremi di connessione tra i vari elementi).

Attraverso il legame spostamenti deformazioni e la legge costitutiva del materiale è poi possibile valutare le sollecitazioni su tutto l'elemento finito.

La fase di calcolo consta di tre momenti successivi:

- Il PRE-PROCESSING dove è costruito il modello ad elementi finiti attraverso:
  - o l'applicazione delle condizioni di vincolo e di carico
  - o la scelta del tipo di analisi da effettuare (analisi statica/dinamica/termica, lineare o non lineare/dipendente o meno dal tempo, ecc.)
  - o la scelta del tipo di elementi finiti (per problemi piani o tridimensionali, ad andamento polinomiale lineare / quadratico / ecc, di tipo asta / trave / lastra / piastra / guscio / tridimensionale, ecc.)
  - o la definizione dei parametri che caratterizzano il comportamento costitutivo dei materiali

- la definizione del reticolo di nodi del problema discreto
- la costruzione della discretizzazione ad elementi finiti assegnando per ognuno i nodi a cui essi fanno riferimento

• Il PROCESSING di analisi vero e proprio con la risoluzione del problema agli elementi finiti.

• Il POST-PROCESSING dove viene elaborata e rappresentata la soluzione attraverso normalmente una interfaccia grafica statica o dinamica.

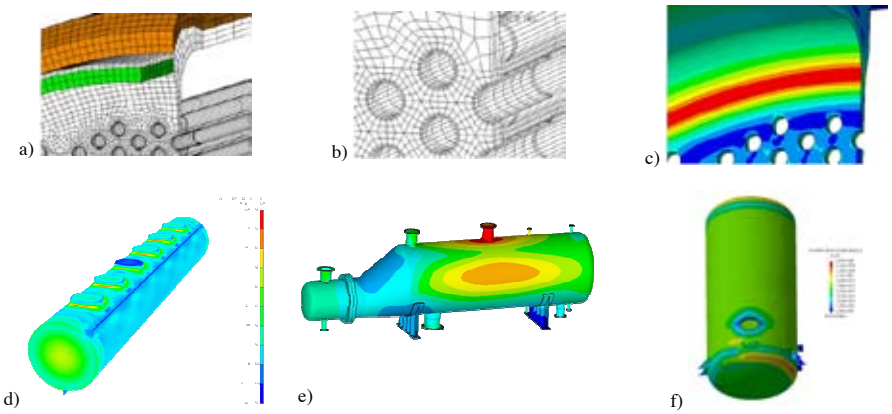


Figura 1 – esempi di visualizzazione grafica dello stato tensionale dell'apparecchio in sollecitazione

In particolare esaminiamo di seguito le importanti fasi preliminari di impostazione del sistema.

Il primo passo consiste nella suddivisione del componente in sottoparti, dette elementi finiti, e nella scelta dei punti, chiamati nodi, sul confine tra elementi contigui o nell'interno degli elementi.

La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da primitive (elementi finiti) di forma codificata (es. triangoli e quadrilateri per domini 2D, esaedri e tetraedri per domini 3D).

Tipologia di elementi finiti Tutti i programmi che impiegano il metodo degli elementi finiti per l'analisi strutturale sono dotati di una libreria di elementi finiti (in campo elastico lineare ma anche in quello elasto-plastico) monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali per facilitare la modellazione di una struttura reale.

I più comuni sono i seguenti: MONODIMENSIONALI (es. asta o biella o truss: elemento rettilineo a 2 nodi, molla o boundary o spring:elemento rettilineo a due nodi dotato di rigidezza assiale e/o rotazionale, ecc.);

BIDIMENSIONALI (es. lastra o stress plane: elemento piano a 3 o 4 nodi per stati di sforzo piano, piastra:

elemento piano a 3 o 4 nodi che possiede solo tre gradi di libertà per nodo, ecc); TRIDIMENSIONALI (es: brick o elemento solido: elemento da 4 a 27 nodi che possiede solo tre gradi di libertà per nodo corrispondenti alla tre traslazioni, ecc).

Nodi: La definizione della geometria del modello che idealizza la struttura reale viene effettuata piazzando dei nodi, o punti nodali, sulla struttura in corrispondenza di punti caratteristici.

Nel posizionare i nodi sulla struttura bisogna tenere presente alcune considerazioni:

• il numero dei nodi deve essere sufficiente a descrivere la geometria della struttura (ad esempio in corrispondenza dell'innesto bocchello-mantello, dei cambi di direzione, ecc.);

• I nodi devono essere posizionati anche nei punti e sulle linee di continuità (ad esempio dove cambiano le caratteristiche dei materiali, le caratteristiche delle sezioni, ecc.);

• si possono posizionare dei nodi in punti non necessari per la definizione geometrica della struttura ma di cui si vogliono conoscere gli spostamenti e le sollecitazioni interne;

• se il software non lo prevede si devono posizionare dei nodi in corrispondenza di punti in cui sono applicati carichi concentrati o masse nodali;

- si devono mettere nodi in tutti i punti che si intendono vincolare;
- nel caso di strutture bidimensionali (piastre, lastre, ecc.) la suddivisione (mesh) in elementi finiti bidimensionali deve essere sufficientemente fitta per cogliere le variazioni di sforzo o di spostamento nelle regioni importanti ai fini dell'analisi.

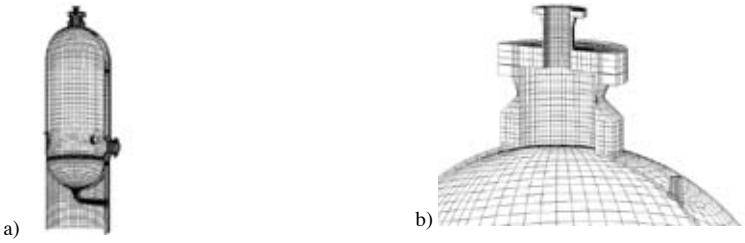


Figura 2 – esempio della distribuzione della mesh nel caso di una colonna

Di seguito vengono commentati i vantaggi connessi all'uso di un'analisi FEM.

I vantaggi consistono nella possibilità di trattare problemi particolarmente complessi tra i quali possiamo elencare:

- geometrie non convenzionali;
- possibilità a confrontare e validare gli esiti del calcolo analitico;
- fattori di sollecitazione di tipo multiplo con andamento lineare e non-lineare;
- complesse e particolari condizioni di vincolo;
- possibilità di analizzare in tempi molto brevi ogni variante di una soluzione base per poi scegliere quella ottimale;
- possibilità di ottimizzare la costruzione riducendo il materiale in eccesso ed il peso dell'intera struttura assicurando allo stesso tempo che il progetto risponda ai criteri di sicurezza;
- impiego di materiali compositi.

3. TRATTAMENTO TERMICO DI UN GIUNTO CIRCONFERENZIALE SUL MANTELLO (CASO A)

Un caso interessante e, senza dubbio delicato, è il trattamento termico in campo di un'alta colonna.

Considerata la presenza di gradienti termici lungo il mantello e la necessità di valutare proprio su tali zone un fenomeno complesso come il buckling, un'analisi agli elementi finiti è fortemente raccomandata.

La sostituzione di un bocchello, di una parte di virola, il ripristino di una saldatura o l'applicazione di un supporto sul mantello non sono mai operazioni semplici quando l'apparecchiatura, a causa dello spessore elevato, dei materiali o sovente per ragioni di processo, necessita di trattamento termico post saldatura.

Un trattamento termico, localizzato o meno, significa portare l'acciaio delle membrature ad una temperatura tale, in cui le caratteristiche meccaniche si abbassano notevolmente, rendendo l'attrezzatura suscettibile a danneggiamento o deformazioni permanenti.

Anche fuori da quelle che possono essere le esigenze e le ristrettezze tempistiche di una fermata, la rimozione della colonna dal suo sito, il posizionamento in orizzontale su dei supporti, opportunamente dimensionati, per effettuare un trattamento termico locale circonferenziale, presenta non pochi inconvenienti.

Di contro, il trattamento termico con la colonna in verticale, a causa del peso della sezione sovrastante la parte trattata e di eventuali azioni esterne, presenta un reale rischio di danneggiamento delle membrature, che l'utilizzatore di solito non è disposto ad assumersi.

Tuttavia, quando ad essere trattata è solamente la parte sommitale del mantello cilindrico, questo tipo di interventi vengono nella pratica realizzati, senza riportare danneggiamenti o deformazioni apprezzabili delle membrature.

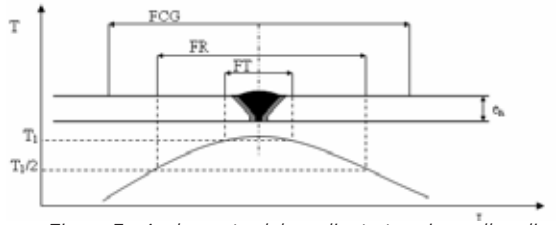
La domanda immediata allora è fino a che punto ci si può spingere, conservando sempre un

adeguato grado di sicurezza?

In termini più tecnici, come può essere valutata la stabilità delle membrature in tali condizioni? Quali sono i fattori da tenere in considerazione? Quali le procedure e le precauzioni da adottare?

Di sicuro è essenziale non prescindere da norme e raccomandazioni generali sull'argomento, fondamentali anche ai fini della simulazione di un modello congruo di calcolo.

Con riferimento alla figura 3, iniziamo innanzitutto ad osservare la struttura di un trattamento termico locale, quale ad esempio di un giunto circonferenziale sul mantello:



Legenda:
e_n: spessore nominale
FT: fascia trattata
FR: fascia riscaldata
FCG: fascia controllo del gradiente

Figura 3 - Andamento del gradiente termico nelle adiacenze del giunto da trattare termicamente

La dimensione FR, al cui centro è posizionato il giunto da trattare, rappresenta l'estensione della fascia su cui si applica la sorgente di calore per il trattamento termico. Anche se la zona che necessita il trattamento è in realtà solo la FT, a causa delle dispersioni termiche dovute a conduzione nel materiale base adiacente, a fenomeni convettivi ed irraggiamento, la fascia effettivamente riscaldata deve essere più ampia. La fascia FT deve assicurare che la minima temperatura di trattamento richiesta si estenda attraverso lo spessore del giunto e delle adiacenti zone termicamente alterate dello stesso. La presenza di elevati gradienti termici in direzione assiale e nello spessore, può generare un elevato stress termico nelle due direzioni, con potenziali fenomeni di buckling e deformazioni permanenti, causati dai momenti flettenti e dalla compressione generati.

Il codice europeo EN 13445-4 § 10.3.3 prevede una larghezza minima della fascia di 5·(R·en)0,5, con il giunto posizionato al centro. Tale fascia deve essere, inoltre, sufficientemente coibentata da avere ai bordi della stessa una temperatura sul mantello non inferiore alla metà di quella di picco sulla saldatura al centro.

La parte del mantello adiacente alla FR va di solito ugualmente coibentata, questa è compresa nella fascia di controllo del gradiente, indicata come FCG in fig. 1. Essa non solo è utile a controllare il gradiente termico assiale, ma provvede anche a ridurre le dispersioni di calore della FR. La EN 13445-4 prevede una larghezza minima della FCG di 10·(R·en)0,5, sempre centrata sulla saldatura.

Il trattamento termico va opportunamente monitorato e controllato, con la disposizione di termocoppie opportunamente disposte sul mantello. Le termocoppie possono essere posizionate al centro del giunto e sui bordi della FR e della FT. Riguardo l'estensione di quest'ultima, il codice armonizzato non definisce una estensione esatta, limitandosi a dire che comprende la saldatura e le ZTA. Un buon criterio può essere quello dato dalle ASME III subsection NB, dove si aggiunge il minore tra lo spessore della saldatura e 50 mm, da ambo i lati ai bordi del giunto.

Durante tutta la fase del riscaldamento, così come nella fase di stasi, i gradienti termici devono essere tenuti rigorosamente sotto controllo, ciò vale anche per la differenza di temperatura tra parete interna ed esterna.

Se la sorgente di calore è solo esterna, si può avere un gradiente termico radiale che genera uno stress circonferenziale, con le fibre esterne del materiale compresse e quelle interne tese. Lo stress risultante è proporzionale al gradiente termico tra le due superfici. Per tale motivo è necessario limitare le velocità di riscaldamento e raffreddamento: secondo la EN 13445-4 con un valore compreso tra 220 °C/hr per spessori non superiori ai 25 mm, 5500/en °C/hr per spessori superiori, fino ad un minimo di 55 °C/hr.

Accorgimenti particolari vanno presi quando all'interno delle tre fasce (FT, RT ed FCG) sono compresi elementi saldati quali bocchelli o supporti, che non richiedono trattamento termico. Su tali discontinuità si possono potenzialmente generare tensioni pericolose e deformazioni

per via dei gradienti termici. Una procedura sicura per evitare di impelagarsi in calcoli complessi e scongiurare sorprese è quella di mantenere, dove sono presenti questi componenti, una temperatura del mantello all'incirca costante. Questo può essere ottenuto estendendo le fasce, in particolare avendo cura che il punto, in cui si può avere la caduta al 50% della temperatura massima sulla saldatura, avvenga fuori dalla intersezione.

Nel caso invece che l'inserto necessiti di trattamento termico, le sorgenti e le considerazioni fatte per il mantello vanno estese anche a quest'ultimo, con la disposizione su di esso di sorgenti termiche e termocoppie dedicate.

Di fondamentale importanza è un corretto isolamento delle fasce interessate: oltre alla conduzione attraverso le pareti, le dispersioni termiche dovute a convezione ed irraggiamento dalle superfici sia interne che esterne vanno opportunamente valutate e limitate.

Per quanto riguarda la conduzione, il fenomeno può essere controllato tramite il posizionamento di sorgenti termiche supplementari e una adeguata coibentazione delle fasce. Convezione e irraggiamento dalla superficie esterna vengono sufficientemente limitati da una buona coibentazione, mentre dalla superficie interna, se non è possibile applicare del coibente, abbiamo inevitabilmente delle perdite maggiori, dovute soprattutto all'irraggiamento. È assolutamente indispensabile non permettere una libera circolazione dell'aria all'interno della colonna, per via dell'effetto camino che inevitabilmente si verrebbe a creare, con tanto di scambio convettivo, se la colonna fosse lasciata aperta. Sarà bene chiudere, durante il trattamento, passi d'uomo, bocchelli, sfiati e qualsiasi apertura presente; se necessario, potranno essere realizzate delle partizioni interne per lo scopo.

Altro fattore essenziale è quello di liberare il più possibile da vincoli e pesi aggiuntivi la colonna, per lo meno a partire dall'estremo inferiore della FCG. La colonna deve essere impedita il meno possibile di espandersi in tutte le direzioni, non solo assialmente, ma anche in direzione radiale e circonferenziale. Non deve essere infatti trascurata una crescita del diametro, che potrebbe essere vincolata da supporti presenti.

Stabilite le condizioni del trattamento termico, si può impostare il modello agli elementi finiti con le seguenti condizioni al contorno:

1) Si assume che la temperatura massima di trattamento venga raggiunta sulla saldatura, si mantenga costante fino ad una distanza, lungo l'asse del mantello, pari alla metà dell'altezza dei bancali periferici, per poi decrescere in maniera lineare allontanandoci dal giunto. In particolare si impone che la temperatura ai bordi della FR sia il 50% della temperatura al centro.
2) Dai bordi della FR agli estremi della FCG la variazione sarà sempre lineare, dal 50% della temperatura max a temperatura ambiente.

   Queste sono delle condizioni limite a cui effettuare l'analisi, tenendo presente che quanto minori saranno i gradienti termici, tanto più stabile risulterà la colonna. In effetti, vedremo che l'abbassamento del valore dello snervamento del materiale del mantello è meno influente sulla stabilità della colonna a vento e peso proprio, di quanto lo possano essere dei forti gradienti termici localizzati. Ciò è dovuto all'elevato momento di inerzia che possiede la sezione di una colonna e alla snellezza mai eccessiva di queste attrezzature.

   Analizziamo un caso concreto di un trattamento termico su un giunto circonferenziale del mantello, eseguito su una colonna presso una raffineria in Sicilia nella prima metà del 2009:

Diametro interno:	4572 mm	*Materiale mantello:*	ASTM SA-516 Gr. 70
Spessore mantello:	24 mm	*Temper. max T.T.:*	620 °C per 1 hr
Spessore gonna:	20 mm	*Salita-discesa:*	100 °C/hr
Altezza gonna:	3000 mm	*Quote giunti trattati (mm):*	+49452 (A); +35235 (B); +19118 (C)
Altezza totale:	52507 mm	*Codice di riferimento:*	ASME VIII div. 2 Appendix 4

In realtà il giunto effettivamente trattato è stato quello a quota (A), tuttavia, ai fini di una valutazione dell'influenza del momento flettente dato dal vento e del peso della parte di colonna sovrastante, abbiamo inserito altri due casi, (B) e (C), rispettivamente a due terzi e ad un terzo di altezza del mantello.

Il trattamento termico è stato realizzato tramite bancali 80 V, costituiti da n° 4 resistenze dim. 400x200 mm bancali, posti a cavallo della saldatura da trattare.

Il primo, fondamentale problema da risolvere è legato all'ammissibile del materiale, per il

quale non sono disponibili dati in normativa per temperature superiori a 538 °C. In Particolare dalla tabella 1A dell'ASME II D, o che si voglia dalla raccolta M, scheda 7i/02, il valore dell'Rp(0.2)T è dato fino a 343 °C. Da tale valore in poi, fino a 538 °C, sono invece tabellati i dati relativi a sR(100000)T. In ogni caso, essendo il trattamento termico una operazione di durata trascurabile per quanto riguarda gli effetti dello scorrimento viscoso, è sensato basare l'analisi sull'Rp(0.2)T anche a temperature più alte di 343 °C.

Il valore dello snervamento, oltre che dalle tabelle ASME, può essere ricavato con la equazione F.153 (1) dell'annesso F delle API 579.

$$\sigma_y=\sigma_y^{rt}\cdot 10^{M} \qquad (1)$$

Dove con σy e σy^{rt} vengono indicati lo snervamento a temperatura e a temperatura ambiente rispettivamente.

M è una funzione della temperatura del tipo $A_0+A_1T+A_2T^2+A_3T^3+A_4T^4+A_5T^5$.

Le API 579 assegnano un campo di validità all'equazione compreso tra 70 °F e 1100 °F (21 °C ÷ 593 °C),

ma tale restrizione riflette solo il limite delle prove STP e non falsa la tendenza del comportamento del materiale per temperature superiori ai 593 °C.

In particolare alla temperatura di 620 °C, siamo ancora abbondantemente sotto la linea AC1, dove non avvengono trasformazioni metallurgiche di sorta, dunque non c'è motivo per cui ci si dovrebbe attendere un comportamento anomalo del materiale a quelle temperature.

Ad ogni modo, a riprova della attendibilità dei valori di snervamento dati dalla F.153 per temperature superiori a 593 °C, si può fare riferimento ai test effettuati ad alte temperature (fino a 1000 °C) su acciai da costruzione. Da queste prove si evince un andamento del fattore di riduzione dello snervamento allo 0,2% degli acciai, sufficientemente in linea con i valori di 10M della F.153

Alla temperatura di 620 °C, per l'ASTM SA 516 Gr. 70, troviamo con la F.153 uno snervamento pari a 143,7 N/mm2, a cui, in via meramente cautelativa, decidiamo arbitrariamente di applicare un coefficiente di sicurezza pari a 0,7. Per il nostro calcolo, assumiamo dunque un valore conservativo pari a 100 N/mm2.

Scegliendo di effettuare un'analisi elastica secondo l'annesso 4 dell'ASME VIII div. 2 e limitandoci ad una verifica per carichi statici, dal diagramma di Hopper vediamo che serve valutare:

$$P_l+P_b+Q \le 3\cdot S_{PS} \qquad (2)$$

Dove S_{PS} è la media algebrica tra gli ammissibili, determinati alla minima e alla massima temperatura nel ciclo operativo. Nel nostro caso, limitandoci ad una analisi in condizioni stazionarie del trattamento, i due valori coincidono, dunque 3·66,7 N/mm2 = 200 N/mm2

Va altresì effettuata una verifica sullo stress triassiale, la somma algebrica dei tre stress principali non deve eccedere di quattro volte l'ammissibile.

$$(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3) \le 4\cdot S_m = 4\cdot 66{,}7\ \mathrm{N/mm^2} = 266{,}7\ \mathrm{N/mm^2} \qquad (3)$$

Come dicevamo, a causa dell'elevato momento di inerzia della sezione della colonna, una verifica a flessione semplice della colonna, con vento a velocità costante di 28 m/s, più il peso della parte sovrastante della colonna, alle tre sezioni darebbe uno stress in N/mm² pari a:

	CASO (A)	CASO (B)	CASO (C)
$S=M_s/W+P/(C_m\cdot t)=$	0,07+0,28=0,35	1,4+1,87=3,27	5,2+3,44=8,64

M_s: momento flettente della sezione sotto esame
W: Modulo di resistenza $(\pi/32\cdot(D_{esterno}^{\ 4}-D_{interno}^{\ 4})/D_{esterno})$
P: Forza peso della parte sovrastante della colonna sulla sezione considerata
C_m: Circonferenza sul diametro medio
t: Spessore mantello

Si tratta solo di stress primari, di modesta entità, senza il contributo determinante dei secondari, causati in particolare dai gradienti termici assiali.

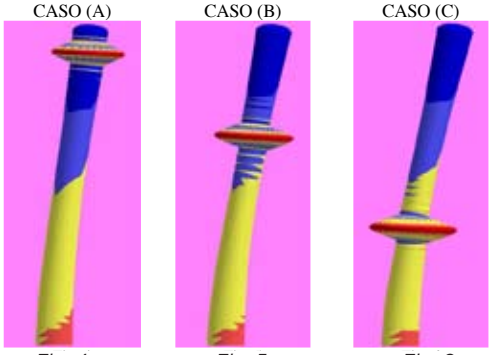


Fig. 4 *Fig. 5* *Fig. 6*

Max (P_l+P_b+Q)	MPa	168	83%	184	91%	204	102%
Max ($\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$)	MPa	129	48%	119	44%	106	39%
Min Coeff. buckling		8,0	50%	7,8	51%	8,0	50%

Il valore massimo degli stress primari più secondari si rileva in tutti e tre i casi sulla saldatura (figure 4, 5 e 6), ed è abbastanza alto già nel caso (A), segno che sono i gradienti termici da soli la causa principale dello stato tensionale. Gli effetti sommati del peso della parte di colonna sovrastante e del momento flettente dovuto al vento, come ci si aspettava, danno un contributo piuttosto modesto in confronto ai gradienti termici.

Se la colonna fosse omogeneamente tutta alla temperatura del trattamento non ci sarebbe stress termico, che è causato solo dai gradienti.

Per capire meglio il concetto immaginiamo idealmente due anelli sovrapposti, saldati tra di loro, uno a temperatura 300 °C, l'altro 100 °C. Quello più caldo tenderà a crescere, oltre che in altezza, anche di diametro, ma sarà impedito da quello più freddo, che tende a restringerlo. Ciò che si viene così a generare è un momento flettente, che sarà tanto più elevato, quanto più alta è la differenza di temperatura fra i due anelli.

Il coefficiente di buckling si attesta ad un valore doppio del minimo ammesso, ed è pressoché costante, rivelandosi il punto più soggetto il tratto di gonna opposto alla direzione del vento.

4. SOSTITUZIONE COMPLETA DI UNA VIROLA DEL MANTELLO (CASO B)

In occasione di una recente fermata, scoibentando una colonna per gli interventi di manutenzione programmati, è stata riscontrata corrosione esterna sul mantello, con diverse aree sottospessorate. In particolare, i sottospessori ritrovati sono distribuiti su tutta la circonferenza, compresi all'interno di una fascia di larghezza 500 mm, immediatamente sotto la sezione troncoconica, cioè all'incirca ai tre quinti dell'altezza totale della colonna di 32 m.

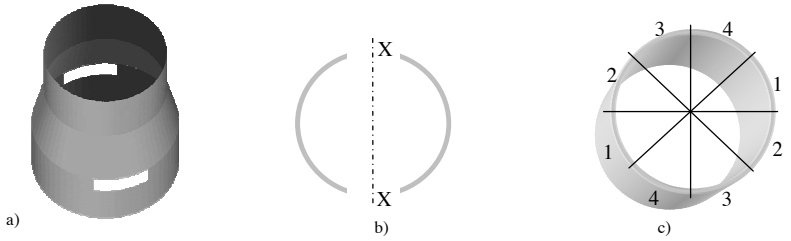


Figura 7 –Rappresentazione della zona della colonna oggetto di intervento di riparazione

Considerata l'estensione delle zone sottospessorate e la mancanza di tempi tecnici per un intervento di riparazione fuori opera, si è convenuto di sostituire l'intera fascia a tratti, lasciando la colonna in loco.

Per velocizzare l'intervento, si è scelto di intervenire contemporaneamente su due tratti di virole

per volta, pari ad un ottavo di circonferenza ciascuno, sfalsati di 180°. Lo scopo è stato quello di permettere il lavoro contemporaneo di due squadre, così quando una era impegnata nella saldatura di un nuovo tratto, l'altra poteva già tagliare il tratto di virola opposto.

Ai fini della sicurezza andava dunque verificata la stabilità nella condizione in cui la colonna era in difetto di due virole opposte.

I seguenti dati si riferiscono alla colonna in esame, le dimensioni sono espresse in mm ed il materiale è Fe 510.2 KW UNI 5869:

	Altezza	*Diametro*	*int. Spessore*
Tronco superiore:	10760	3050	16
Tronco inferiore:	16150	3650	20
Tronco di Cono:	1450	-	20
Gonna	2700	3648	18

Considerando una velocità costante del vento su tutta la colonna, pari a 28 m/s, peso proprio più interni, possiamo determinare il momento flettente sulla sezione indebolita, nella direzione più sfavorita, cioè assumendo come asse neutro X-X (Fig. 7), otteniamo uno stress pari a:

$$S = M_s/W+P/(C_m \cdot t) =$$

$$2{,}73 \cdot 10^8/5{,}26 \cdot 10^7+1{,}92 \cdot 10^5/(3670 \cdot 20) =$$

$$7{,}81\ N/mm^2$$

M_s: momento flettente della sezione sotto esame (N·mm)

W: Modulo di resistenza ($\pi/128 \cdot (D_{esterno}^4 - D_{interno}^4)/D_{esterno}$) ($mm^3$)

P: Forza peso della parte sovrastante della colonna sulla sezione considerata (N)

C_m: Circonferenza sul diametro medio (mm)

t: Spessore mantello (mm)

È un valore di stress contenuto, che non desta particolari preoccupazioni, tuttavia è un dato che non tiene conto delle tensioni secondarie, indotte dalle aperture, senza contare che non sappiamo come varia il coefficiente di buckling in tali condizioni.

Questo è certamente un caso in cui un'analisi agli elementi finiti può rivelarsi preziosa. Procedendo ad una analisi con i criteri di valutazione dell'appendice 4 dell'ASME VIII div. 2, otteniamo invece un valore massimo dello stress primario più secondario (Pl+Pb+Q) pari a 59,4 N/mm2, localizzato lungo i bordi superiori delle aperture.

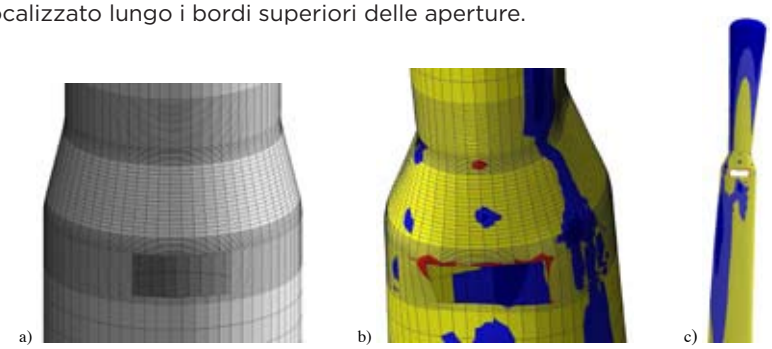


Figura 8 – Rappresentazione grafica FEM. Particolare apertura circonferenziale: a) mesh adottata; b) stato tensionale e deformato. Intera colonna: c) stato tensionale e deformato.

Tale valore è decisamente più alto dello stress trovato nel caso della flessione semplice, ma comunque al di sotto del valore massimo consentito, che è tre volte l'ammissibile del materiale.

La presenza delle aperture determina, inoltre, una riduzione del fattore di buckling di appena il 10%, che passa così da 105 a 94, dove il minimo ammesso può essere 4 o 5.

CONCLUSIONI

Il metodo degli Elementi Finiti permette di risolvere il problema della determinazione dello stato di sforzo e deformazione in elementi in condizioni di carico per le quali non è reperibile o ricavabile la soluzione analitica. In questo metodo si discretizza il continuo, che ha infiniti gradi di libertà, con un insieme di elementi di dimensioni finite, tra loro interconnessi in punti

predefiniti (nodi).

Caso a). Abbiamo visto che effettuare un trattamento termico circonferenziale sul mantello di una colonna a quote basse, non presenta rischi eccessivamente maggiori di un trattamento in cima. Lo stress causato dal vento e dal peso proprio della attrezzatura danno un contributo modesto rispetto a quanto possono invece causare i gradienti termici sulla zona trattata. Tale contributo potrebbe tuttavia rivelarsi significativa se lo stress dato dai gradienti termici non viene opportunamente valutato e limitato. È dunque essenziale non solo analizzare convenientemente ogni singolo caso, definirne i parametri vincolanti e applicare i banchi, le termocoppie e la coibentazione in maniera opportuna, ma soprattutto vigilare durante tutto il ciclo di trattamento, che i gradienti limite non vengano superati.

Caso b). Non è possibile effettuare una verifica di stabilità della colonna, adeguata allo scopo, in presenza delle aperture temporanee con i metodi tradizionali, basati su formule, descritti su norme o manuali.

L'analisi agli elementi finiti si rivela di contro un mezzo potente, in grado di fornire una visione più compiuta della distribuzione delle tensioni, nonché del sorgere di stress interni secondari e del pericolo di buckling.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] M. Guagliano, L. Vergani, "Appunti delle lezioni di Costruzione di Macchine del prof. A. Terranova", Edizioni Cusl, 1998.

[2] D. Annaratone, "Recipienti in pressione - Verifiche di stabilità", Prima Edizione, Edizioni Clup, 1979.

[3] D.R.Moss, "Pressure Vessel Design Manual", First Edition, Gulf Publishing Company Book Division.

[4] W.C. Young, R.G.Budynas, "Roark's Formulas for Stress and Strain", Seventh Edition, McGraw-Hill, 2002.

[5] W.J.Carter, B.E.Ball, "Guidebook to ASME Section VIII Div. 1", Second Edition, McGraw-Hill, 2000.

[6] Cosmos, "Structural Research & Analysis", Cosmos/M v. 2.9, Corporation (SRAC).

[7] F. Tordini, "Dimensionamento e verifica di resistenza di un apparecchio in pressione", Università degli Studi di Bergamo, Facoltà di Ingegneria, 2002.

[8] Bathe, K. J., "Finite Element Procedures", Prentice Hall, New Jersey, 1996.

[9] CISM, "Analisi per elementi finiti: modellazione strutturale e controllo dei risultati", 1991.

[10] A. Bove, "Introduzione ai programmi di calcolo strutturale - Sap 90 - Supersap - Cosmos e i programmi shareware", 2 ed., Dario Flaccovio ed., 1995.

[11] Computer & Structures Inc., Wilson E. L., Habibullah A., "Sap 90 - A Series of Computer Program for the Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures, Users Manual", Berkeley, 1988.

[12] CSI Computer and Structures, Inc., "Sap 2000 - Getting Started", "Tutorial Manual", 1997.

[13] CSI Computer and Structures, Inc., "Sap 2000 - Basic Analysis Reference", 1997

[14] R. D. Cook, "Finite Element Modeling For Stress Analysis", ISBN 0-471-10774-3

[15] UNI EN 13445-3 "Eurocodice 3 "Unfired Pressure Vessels, EN 13445-3, annex B & C", 2009

[16] ASME "Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1&2", The American Society of Mechanical Engineers, 2001 Edition, 2009 Addenda, ISBN: 9780791832516.

[17] WRC Bulletin 452 "Recommended Practices for local heating of welds in pressure vessels", June 2000.

[18] UNI EN 1993 Parte 1-2 "Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio" Ed. 2005.

[19] J.Chen., B. Young, B. Uy: "Behaviour of High Strength Structural Steels at Elevated Temperatures", Journal of Structural Engineering, December 2006 pp. 1948-1954

[20] Eugene F. Megyesy, Paul Buthod: "Pressure Vessel Handbook", Pressure Vessel Handbook Publishing, 2008

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

Analisi a creep di saldature con metodi di DBA soggette a carichi combinati esterni di pressione e temperatura

A. Dragonetti ** ***- L. Gaetani*** **
F. Vivio*

** Dip. di Ing. Meccanica - Università di Roma Tor Vergata*
*** Eleo2 Engineering srl*

1. SOMMARIO

L'analisi a creep di strutture saldate soggette a carichi termici e strutturali è un problema spesso di non semplice soluzione che può essere affrontato tramite analisi agli elementi finiti (FEM-FEA) combinati con metodi di Design By Analysis (DBA). La progettazione con metodi DBA, secondo alcuni codici normativi di calcolo (ASME III div 1, EN 13445 "*direct route*"), ed integrati con metodi FEM, consente, seppur con le dovute attenzioni e limitazioni, di valutare correttamente gli eventuali rischi connessi all'applicazione di determinate condizioni di carico dei componenti strutturali di impianto operanti in regime di scorrimento viscoso (*creep*) quali, ad esempio gli apparecchi in pressione, gli scambiatori di calore, piping e loro componenti. Dette analisi consentono la verifica dei diversi modi di guasto che si possono presentare in queste condizioni di funzionamento: rottura a *creep*, danneggiamento progressivo, interazione *creep* – fatica. Nel presente lavoro, in aggiunta alle metodologie a codice, viene proposto un approccio che prevede l'utilizzo delle curve isocrone del materiale per una data temperatura di esercizio; viene quindi analizzata una particolare configurazione di saldatura soggetta a differenti condizioni di tempo, temperatura, pressione e carichi esterni. Inoltre viene svolto un confronto tra i risultati ottenuti dai diversi approcci di calcolo previsti dalle normative di settore nonché quelli ottenuti con l'approccio proposto nel presente lavoro.

2. INTRODUZIONE

La progettazione in regime di *creep* degli apparecchi in pressione e dei loro componenti è un problema affrontato da diversi codici normativi di calcolo nazionali ed internazionali.

Storicamente, i codici normativi di calcolo che per primi hanno introdotto l'analisi e la verifica in regime di *creep* con metodi di DBA sono stati quelli operanti in ambito nucleare (in primo luogo il codice americano ASME III div 1 sottosezione NH [1] ed il codice francese RCC-MR [2]), ove le elevatissime temperature di esercizio rendevano maggiormente complesse le analisi necessarie. Per la complessità di dette tipologie di analisi, le metodologie maggiormente utilizzate sono state spesso riferite a tecniche FEM ed a procedure di DBA.

In letteratura esistono numerosi modelli di *creep* , come ad esempio il modello di Norton [3], più idoneo in caso di stress non elevati, quello di Dorn [4] più idoneo invece per alti sforzi o quello di Garofalo [5], valido in modo più generale per non citare i vari modelli microstrutturali basati sull'energia di attivazione relativa al meccanismo di *creep* principale [6]. Tal modelli possono essere usati nelle analisi FEM di strutture, tuttavia nell'approccio di un sistema complesso soggetto a regime di *creep,* possono risultare eccessivamente onerose nella valutazione dei modi di guasto dei reattori di tali tipologie di impianti.

Recentemente, con l'aumentare delle temperature di processo, anche per tipologie di

impianto non nucleari, la problematica è stata estesa ed affrontata e quindi inclusa dagli altri codici attinenti la progettazione degli apparecchi in pressione come, ad esempio, la norma europea EN 13445-3 [7] ed il codice statunitense ASME VIII div 2 [8]; tuttavia, quest'ultimo ha visto la sua applicazione solo ad alcune tipologie di materiali (CC2605) e per un ristretto campo di temperatura. Da notare però che il codice ASME VIII div 2 ben si integra con il codice API 579 – ASME FFS [9] che nasce per il *Fitness for Service* ed include procedure e tecniche di verifica del danneggiamento delle apparecchiature anche in regime di *creep*. In Fig. 1 sono sintetizzati i campi di applicazione delle metodologie DBA e *creep* nei vari codici normativi di calcolo.

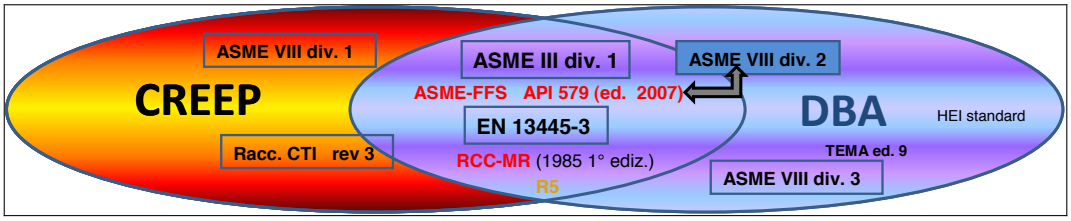


Figura 1 – Campi di applicazione DBA e creep nei vari codici normativi

I modi di guasto da considerare in sede di progetto di apparecchiature in regime di *creep* sono tutti i modi di guasto cosiddetti *time independent* a cui vanno aggiunti i modi di guasto cosiddetti *time dependent*:

- *Creep rupture* (rottura per carichi eccessivi)
- *Excessive creep strain* (rottura per deformazioni eccessive)
- *Creep fatigue interaction* (rottura per combinazione di creep e fatica)
- *Creep buckling* (cedimento per instabilità – creep)
- *Creep cracking* (rottura fragile)

Nel presente lavoro, in aggiunta alle metodologie a codice, viene proposto un approccio che prevede l'utilizzo delle curve isocrone del materiale per una data temperatura di esercizio utilizzando metodologie FEA; viene quindi analizzata una particolare configurazione di saldatura soggetta a differenti condizioni di tempo, temperatura, pressione e carichi esterni. Inoltre viene svolto un confronto tra i risultati ottenuti dai diversi approcci di calcolo previsti dalle normative di settore nonché quelli ottenuti con l'approccio proposto nel presente lavoro.

3. PROCEDURE DELLA ASME III SOTTOSEZIONE NH

Le procedure della ASME III sottosezione NH si basano sull' analisi in campo elastico lineare e sulla categorizzazione degli *stress* tipici dei metodi classici di DBA; le apparecchiature analizzate con tali metodi sono denominate di classe 1 e vengono analizzate sulla base del rischio di *failure* loro associato, in tal senso si definiscono i carichi di servizio livello *A, B, C, D* rispetto ai quali vengono fissiti limiti di accettabilità di *stress* e di *strain* di vario livello. In Fig. 2 viene sintetizzata la categorizzazione dei carichi ed il flusso delle verifiche secondo la ASME III sottosezione NH.

Comunque l'applicazione delle procedure è limitata ad alcuni classi di materiali ed in relazione ad un certo intervallo di temperatura (in Fig. 3 sono riportati i limiti di servizio per le classi di materiali ammesse in ASME III sottosezione NH); da notare che sebbene tali intervalli di temperatura siano ad oggi sufficienti per la maggior parte delle tipologie di impianto, proprio per quelli nucleari di nuova concezione, i materiali e gli intervalli applicati non risultano più idonei, così come non risultano appropriate talune assunzioni di base sul comportamento a *creep* di detti materiali, come ad esempio le leghe N06617 e N06002.

Sostanzialmente la ASME III parte dalle stesse procedure di analisi per i componenti non in regime di *creep* applicando dei limiti sugli *stress* primari che dipendono invece dal comportamento in regime di *creep* basato sulle curve che sono presenti nella *Mandatory*

Appendix 1-14 [1]. Anche le procedure per la verifica di *shakedown* e per il *thermal rattchetting* sono delle varianti a quelle già applicate per i materiali non in regime di *creep* considerando che questa volta i limiti sono in realtà dei limiti di *strain* e non di *stress*; tali procedure dovranno essere corrette a causa dell'assunzione di comportamento lineare del materiale, introducendo coefficienti che tengono conto del reale comportamento non lineare, sempre del materiale, in regime di creep. Tali procedure sono dettagliatamente descritte nel *Non Mandatory Appendix T* della norma [1].

I limiti assoluti sulle deformazioni principali ε_1, ε_2, ε_3 sono:

- 1% della deformazione principale massima, in media, nello spessore;
- 2% della deformazione principale massima sulla superficie, dopo la linearizzazione delle deformazioni;
- 5% delle deformazione principale massima locale.
- Occorre precisare inoltre che i limiti sono dimezzati nell'area delle saldature.

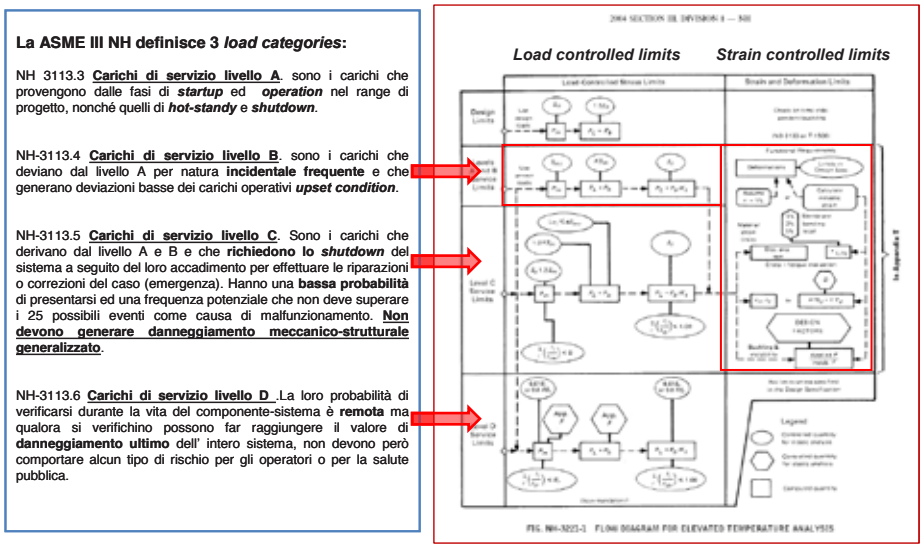


Figura 2 – Categorizzazione dei carichi e flusso delle verifiche per ASME III sottosezione NH

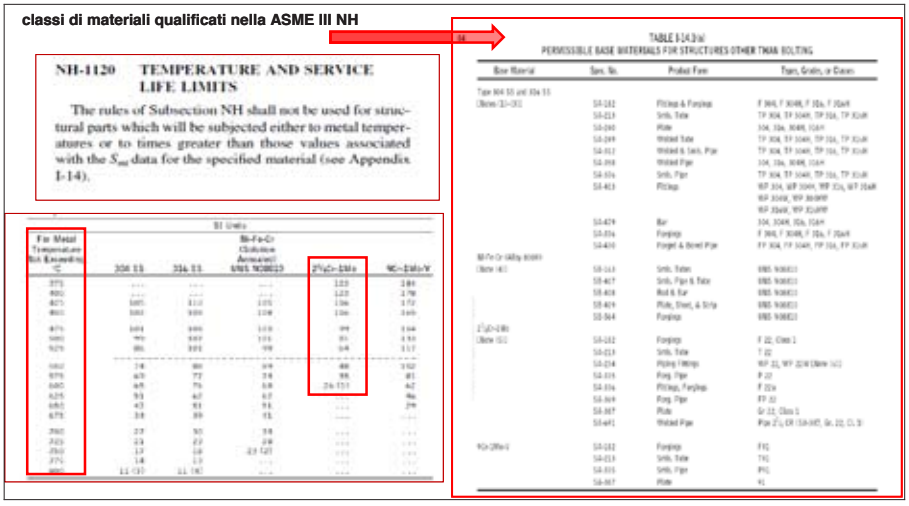


Figura 3 – Limiti di servizio per le classi di materiali ammesse in ASME III sottosezione NH

Analogamente in caso di analisi a *creep – fatica* le procedure previste dal codice ASME III sottosezione NH prevedono un'interazione tra il danneggiamento a *creep* ed il danneggiamento a fatica di tipo bilineare con la definizione di un campo di esistenza di ammissibilità del materiale; pertanto, partendo dalle curve di fatica basate sullo *strain* ammissibile e dalle curve di rottura a *creep* basate su una temperatura di riferimento, si determinano i valori del numero di cicli massimo ammissibile e del tempo di vita a creep ammissibile per una data combinazione di *stress* e *strain* che si realizza nel ciclo. Confrontando tali limiti con il numero di cicli effettivo ed il tempo ciclo effettivo si individua il fattore di danneggiamento che si verifica essere all' interno del campo di esistenza bilineare del materiale ammesso; il processo viene descritto in Fig. 4

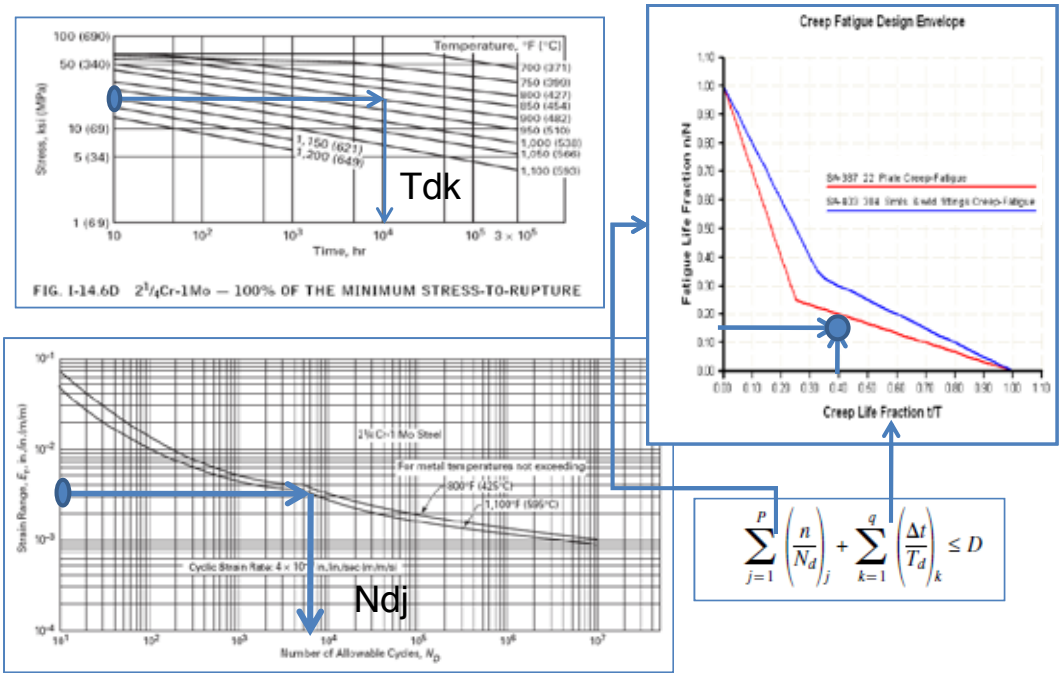


Figura 4 – Procedura di verifica a creep – fatica secondo Non Mandatory Appendix T

In Fig. 4, P è il numero dei differenti tipi di cicli,$(n)_j$ è il numero di ripetizioni per ciclo tipo $j(Nd)_j$ è il numero di cicli ammissibili di tipo j, è il numero di intervalli di danneggiamento a creep; $(\Delta t)_k$ è il tempo di applicazione del ciclo di tipo k,$(Td)_k$ è il tempo massimo ammissibile dato dalle curve di rottura al tempo di intervallo k.

In generale si può dire che le procedure della ASME III sottosezione NH sono esaustive dei potenziali modi di guasto possibili (con esclusione della verifica ad instabilità) e, poiché sono essenzialmente basate su un'analisi elastica lineare, consentono una veloce valutazione attraverso metodi FEM del modello usato; tuttavia le correzioni da approntare per valutare l'effettivo comportamento del materiale, e quindi gli effettivi valori di σ, ε, $\Delta\sigma$ e $\Delta\varepsilon$ che sono in generale in regime di *creep* e che pertanto si verificano in un regime di forte non linearità, richiedono una complessa rielaborazione della metodologia basata su coefficienti correttivi e tabelle.

4. PROCEDURE DBA DELLA NORMA EUROPEA IN REGIME DI CREEP

Recentemente la norma europea basata sul principio della *PED* ha introdotto l'analisi in regime di *creep* nell'articolo 19 e nell' "*ANNEX B Direct route Method*". In modo coerente rispetto a quanto previsto negli euro codici e nella norma EN stessa, l'approccio basato sull'analisi elastica

lineare viene sostituito dall' approccio basato sull'analisi limite che trae fondamento applicativo, in regime di *creep*, sul principio del *reference stress* [10]. Senza addentrarsi nell'analisi dei fondamenti teorici di questa metodologia, per cui si rimanda ai testi specifici in letteratura, si può dire che il metodo consente di effettuare le seguenti verifiche in regime di creep:

- ***Creep – rupture design check***
- ***Excessive creep strain design check***
- ***Creep fatigue design check.***

Anche se effettivamente solo le prime due verifiche sono affrontate in dettaglio nella norma, per l'ultima verifica viene solo dato il criterio per soddisfarla. La norma europea considera solo i materiali definiti coerentemente alla normativa stessa e quindi è necessario avere conoscenza di una serie di parametri di rottura a *creep* a varie condizioni di tempo e temperatura o bisogna far riferimento a metodi di interpolazione definiti nell'*Annex S* della norma stessa.

La EN 13445 introduce quindi un approccio moderno all'analisi a *creep* che si basa su quelle che sono le metodologie sviluppate dal *BS standard* in questo ambito: le procedure chiamate *R5* [11] ed *R6* [12]. Ovviamente entrambi i codici prevedono la possibilità di analizzare il problema in forma esplicita, ovvero assumendo un legame costitutivo del materiale che tenga conto delle variabili tempo e temperatura.

I modelli di *creep* disponibili in letteratura precedentemente richiamati, sono implementati nei vari codici FEM commerciali più noti attraverso metodi di integrazione esplicita ed implicita [13]. Il primo metodo è fortemente influenzato dal valore dell'intervallo temporale che si sceglie per l'integrazione che, se preso troppo piccolo, può causare una lenta convergenza verso la soluzione od una divergenza. Il secondo, a differenza del primo, non presenta alcuna limitazione relativa all'intervallo temporale anche se risulta più oneroso per il calcolo; inoltre grazie alla sua maggiore stabilità (è un metodo incondizionatamente stabile) è quindi da preferirsi al primo nella valutazione dei problemi relativi al *creep*.

5. METODO DELLE CURVE ISOCRONE

Tra gli approcci per la verifica a *creep* elencati in precedenza, esiste un ulteriore metodo di approccio denominato metodo delle curve isocrone.

Le curve isocrone del materiale sono le curve basate sulla misura del *total strain* che include la deformazione elastica, plastica e di *creep* come funzione del tempo sotto l'azione di un carico monoassiale costante ed un livello di temperatura fissato. È possibile quindi definire diverse curve *stress – strain*, a parità di tempo e per un certo livello di temperatura di *creep* (Fig. 5).

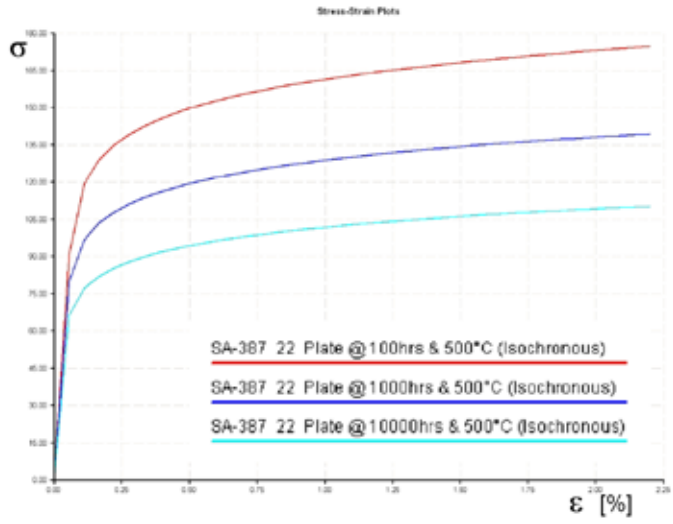


Figura 5 – Curve isocrone per materiale SA 387 gr 22 a 100 – 1000 – 10000 ore a 500°C

Il metodo si basa sull'utilizzo di tali curve come se fossero curve *stress – strain* del materiale e ciò consente di spostare il problema di analisi a *creep* da un problema *time dependent* ad un problema *time independent*. Tale approccio prevede però, nelle condizioni di stress multi assiale, che l'incremento dei carichi avvenga in maniera proporzionale fino al carico finale; in caso contrario si potrebbero verificare delle deformazioni superiori a quelle finali, inficiando la validità del metodo. Tale approccio viene dettagliatamente affrontato da Zhao e Koves [14] e ne viene data piena validità anche in caso di diversi livelli di carico e temperatura durante la vita utile del componente con il principio delle curve isocrone differenziali. Inoltre, tale metodo consente di approcciare in modo esaustivo anche il problema del *buckling* in regime di *creep* [15]. Tale modo di guasto viene affrontato, in modo sicuramente non esaustivo, solo dalla Asme III, ove peraltro le relative validazioni devono ancora essere affrontate.

Il metodo ben si presta quindi per un'analisi FEM in campo elasto – plastico ed è comparabile per difficoltà operativa ad un'analisi limite, con il vantaggio di fornire informazioni più vicine alla realtà per quello che riguarda il reale stato di *stress – strain* di un materiale ad un certo tempo ed un certo livello di temperatura; tale metodologia consente inoltre di valutare, con buona approssimazione, anche condizioni di variazione dei carichi e di temperatura durante la vita operativa dell'apparecchiatura, che è una situazione molto comune nella pratica ingegneristica.

6. STUDIO COMPARATIVO

Di seguito viene effettuata una comparazioni di alcuni risultati ottenuti con i vari metodi sopra citati sull'analisi di una saldatura di un reattore petrochimico in regime di *creep.*

L'analisi FEM è stata effettuata attraverso la definizione di un modello assialsimmetrico della zona saldata (Figg. 6, 7, 8) con il reattore e soggetto ai carichi di pressione, peso proprio, carichi interni dovuti a cicloni alla temperatura di 560°C; si è considerato un tempo di vita di 200000h per un materiale SA 387 gr22 classe 2 equivalente a 10CrMo 10-9.

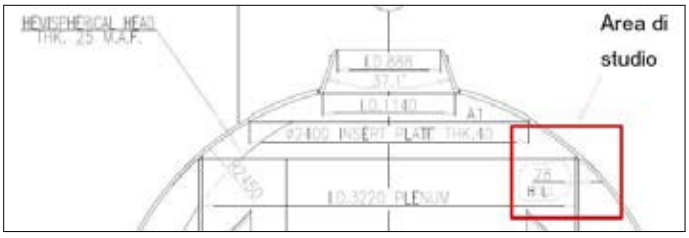


Figura 6 – Zona del reattore oggetto dello studio comparativo

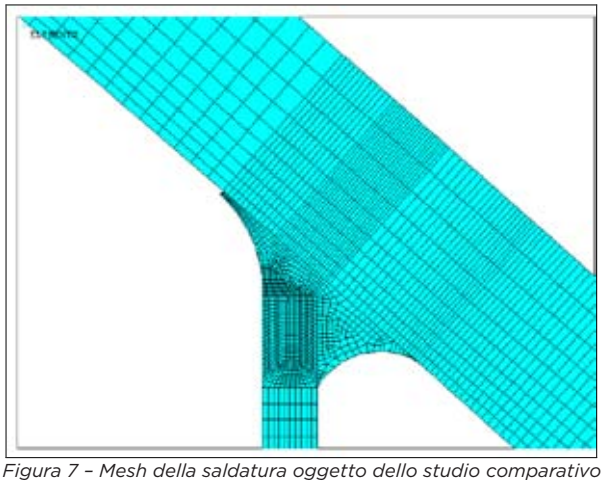
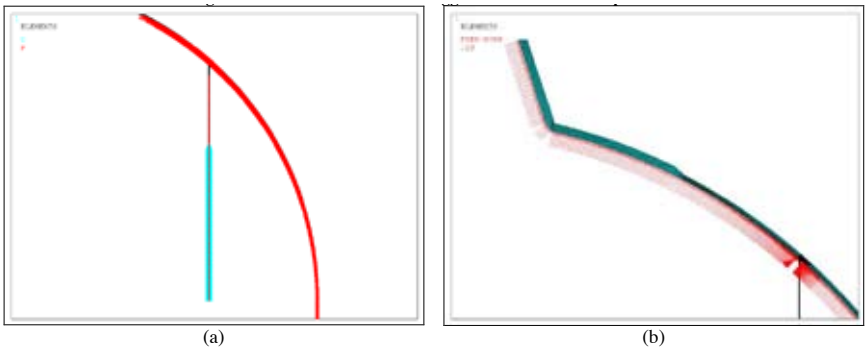


Figura 7 – Mesh della saldatura oggetto dello studio comparativo



(a) (b)

Figura 8: (a) Carichi esterni dei cicloni applicati al plenum saldato sul reattore; (b) carichi di pressione sul reattore

L'applicazione dei metodo elastico – lineare ha fornito i valori di stress linearizzato principale riportati in Fig. 9.

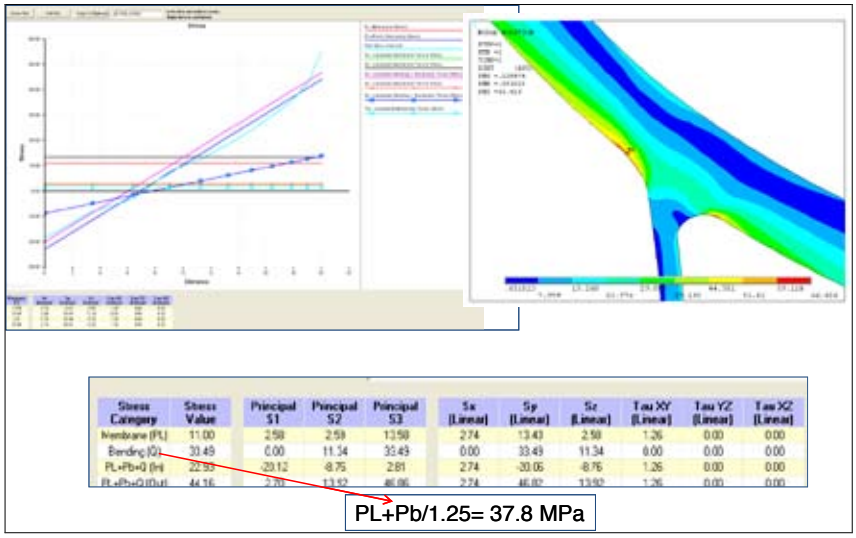


Figura 9 – Analisi elastica con categorizzazione e linearizzazione degli stress

Considerando conservativamente lo *stress* di membrana locale coincidente con quello generalizzato, secondo quanto stabilito dalla procedura NH-3221, quest'ultimo va confrontato per le saldature con il valore

$$Smt = \min\{Smt, 0.8 \times Sr \times R\} \quad (1)$$

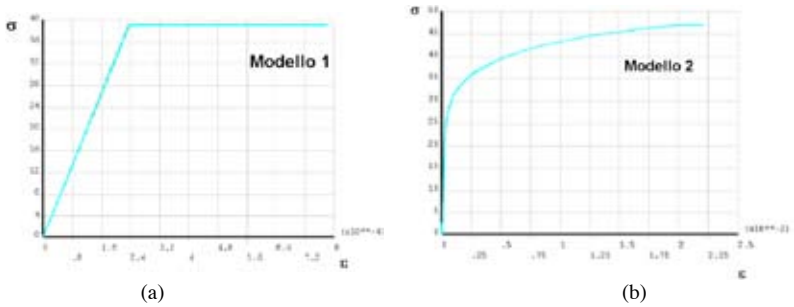
che, nel caso in esame, essendo R=0.98, da interpolazione tabella I-14.10 D-1 e Sr=53MPa da tabella I-14.6D risulta comunque verificato.

Questa analisi non ci fornisce alcuna indicazione sull' effettivo valore di *strain* della saldatura.

Successivamente è stato applicato un modello di *creep* di tipo Norton con i seguenti parametri:

$$\frac{de}{dt} = K' s^{m} \quad (2)$$

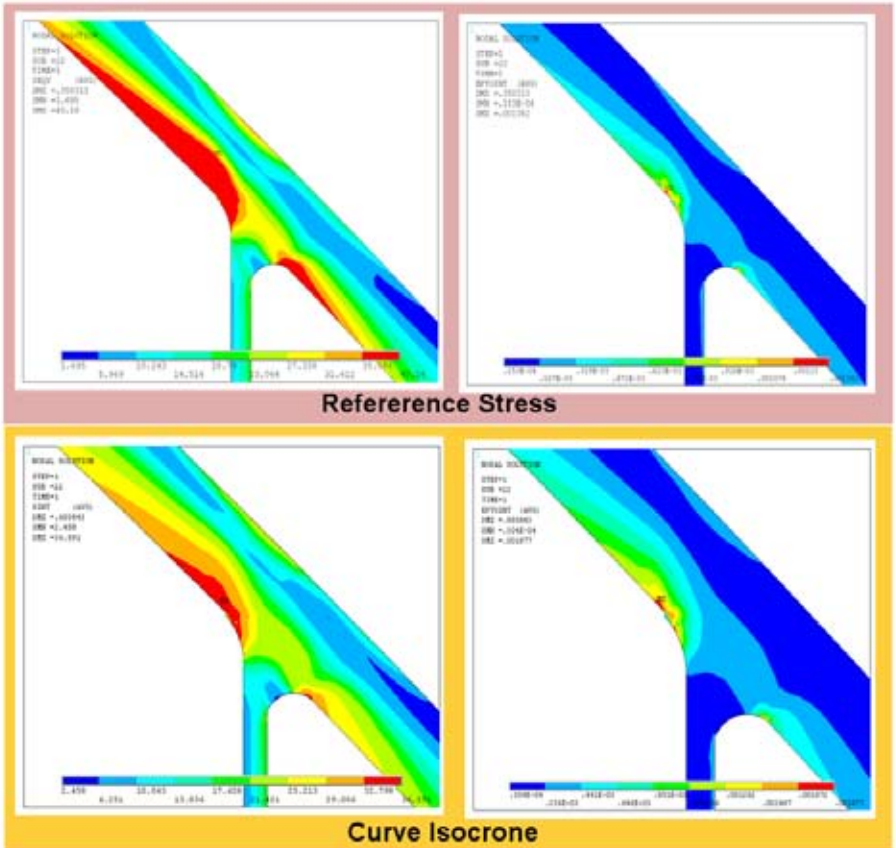
con $K' = 4.4\text{e-}22$; $m = 3.15$. Questi parametri sono stati ricavati da [16].



(a) (b)

Figura 10– (a) Modello di materiale bilineare; (b) modello pseudo stress – strain con curva isocrona

In aggiunta al precedente è stato applicato un modello di materiale con curva bilineare per la verifica con il metodo europeo (Fig. 10a) nonché un modello di materiale "pseudo" *stress – strain* (Fig. 10b) ovvero con una curva di risposta coincidente con la curva isocrona del materiale alla temperatura ed al tempo di analisi. I risultati compartivi sono riportati in Fig. 11 e mostrano come specialmente il modello con curva isocrona porti a dei risultati in termini di *stress* e di *strain* molto vicini al modello esplicito a *creep*



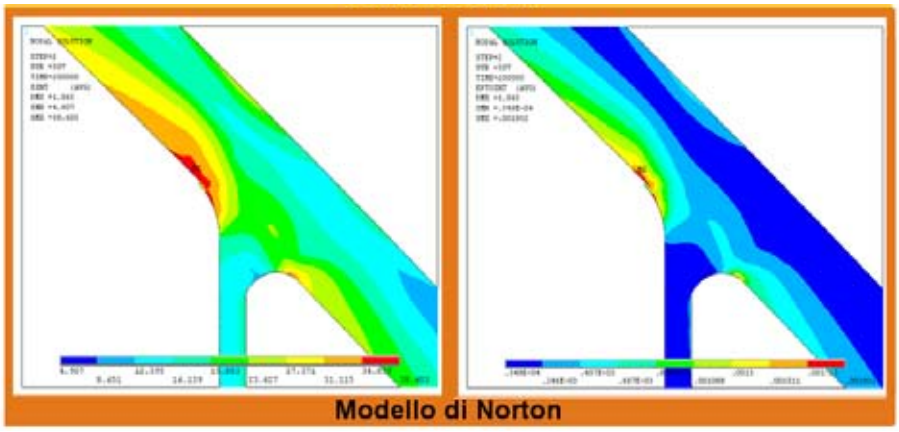


Figura 11 – Risultati comparativi dell'analisi con metodo direct route, curve isocrone ed esplicito a creep

7. CONCLUSIONI

La progettazione a creep di elementi strutturali di impianti in pressione e loro componenti può essere convenientemente affrontata con i codici normativi di calcolo ASME III, parte della ASME VIII div 2 ed EN-13445 che forniscono, con differenti approcci, validi risultati per i principali modi di guasto di queste apparecchiature operanti ad alta temperatura. Di notevole interesse risulta il metodo delle curve isocrone che, sebbene non ancora codificato, permette di affrontare il problema senza dover ricorrere a più complessi modelli costitutivi del materiale. L'introduzioni di quest'ultimo modelli presentano sì il vantaggio di fornire una soluzione esatta, nei limiti delle approssimazioni, comunque presenti, nella definizione del modello di comportamento del materiale, ma hanno lo svantaggio di avere tempi lunghi di analisi e soprattutto richiedono la conoscenza dei parametri del modello costitutivo del materiale che sono difficilmente reperibili in letteratura, e quindi ottenibili, nella maggior parte dei casi, solo attraverso onerose prove sperimentali. Il metodo del *reference stress* sembra essere tendenzialmente il meno conservativo tra quelli utilizzati per la valutazione delle deformazioni ma un'analisi più estensiva è necessaria per poter ulteriormente confermare tale considerazione. È pertanto possibile ipotizzare l'utilizzo congiunto del modello delle curve isocrone e della metodologia applicata nella normativa europea, in termini di procedure e di ammissibilità dei risultati ottenuti dal calcolo

8. BIBLIOGRAFIA

[1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III-rules for construction of nuclear facility Components, Division 1 subsection NH.

[2] RCC – MR (MRx) Code for fast reactors, Edition 2007, AFCEN.

[3] F. H. Norton, The Creep of Steel at High Temperature, McGraw-Hill, London, 1929.

[4] J. E. Dorn, Some fundamental experiments on high temperature creep, *Journal of Mech. Phys. Solids*, Vol. 3, 1955.

[5] F. Garofalo, Fundamentals of Creep and Creep Rupture in Metals, MacMillan, New York, 1965.

[6] G.E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill, third edition, 1986.

[7] European Standard EN 13445 – 3: 2002 E, Unfired Pressure Vessels – parte 3: Design, aggiornamento 2009.

[8] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, 2007 + addenda 2009.

[9] API 579 – 1/ASME FFS – 1, June 5, 2007

[10]I. W Goodall: " Reference Stress Method – Analysing Safety and Design", Professional

Engineering Publishing, London, 2003.

[11] R5, Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Issue 2, British Energy Generation, 1999.

[12] R6, Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Revision 4, British Energy Generation, 2001.

[13] ANSYS Release 11.0. User Manual, ANSYS Inc., USA; 2007.

[14] M. Zhao and W. Koves: "The Isochronus Stress – Strain Method with Multi-axial stress states and variable loading conditions", *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference proceedings*, Prague (Czech Republic), 2009.

[15] S. R. Krishnamurthy and W. J. Koves: "Instability of inverted fired heater coils in the creep regime", *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference proceedings*, Prague (Czech Republic), 2009.

[16] E. Gutierrez Miravete, Appunti online del corso "Classical and Computational Solid Mechanics", Department of Engineering and Science, Rensselaer University at Hartford.

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

Valutazione e gestione del rischio delle camere iperbariche nelle Strutture Sanitarie

*G. de Gennaro**
*M. Godono** - M. Nardelli***
*G. Di Palmo****

** ISPESL Dipartimento territoriale di Bari*
*** Sistemi Iperbarici Srl – Gruppo SAPIO*
**** Artis Srl*

SOMMARIO

Le camere iperbariche possono essere considerate attrezzature a pressione "singolari", sia per il fatto di essere destinate a contenere persone, peraltro spesso vulnerabili quali i pazienti, sia perchè attrezzature il cui rischio pressione risulta essere marginale rispetto ad una serie di problematiche di installazione, impiantistiche e di gestione e controllo dei parametri di esercizio.

Come noto le camere iperbariche, oltre ad essere disciplinate dalla direttiva PED 97/23 CEE, devono anche rispondere ai dettami della direttiva Dispositivi Medici 93/42/CEE, per cui il processo di gestione del rischio deve essere orientato al bilanciamento tra rischi residui e benefici medici che può trarne il paziente utilizzatore dall'uso del dispositivo medico.

D'altro canto una corretta installazione ed una efficace gestione della sicurezza di una camera iperbarica, richiede una serie di risorse ed apprestamenti impiantistici forniti dalla Struttura Sanitaria destinataria, tra i quali i più importanti ricordiamo l'impianto elettrico, l'impianto di distribuzione dei gas medicali, nonché gli apprestamenti necessari per il funzionamento del sistema antincendio della camera iperbarica. La valutazione e la gestione del rischio di una camera iperbarica dipende anche da questi sistemi impiantistici "esterni" alla stessa, per cui in fase progettuale e di fabbricazione è necessario un proficuo "interfacciamento" tra la ditta fornitrice – installatrice della camera iperbarica e gli appositi servizi preposti della Struttura Sanitaria (Servizio di Ingegneria Clinica, Ufficio Tecnico, Servizio di Prevenzione e Protezione, Amministrazione).

Nell'ambito delle strategie di riduzione e controllo del rischio di una camera iperbarica, vi è infine l'attività di manutenzione, di fondamentale importanza per la conservazione delle prestazioni della stessa nel tempo. La gestione della manutenzione è una attività critica in quanto normalmente indipendente dal fabbricante, è un' attività che viene normalmente gestita, programmata, effettuata e monitorata dall'utilizzatore finale, ed è un'attività che deve essere opportunamente registrata di cui deve essere disponibile lo storico delle operazioni effettuate, allo scopo di responsabilizzare il personale addetto e individuare situazioni e componenti critici su base statistica.

In tale contesto la "*Sistemi Iperbarici s.r.l.*" società del gruppo *SAPIO* e azienda leader nella progettazione e produzione di sistemi iperbarici, ha messo a punto un sistema di gestione di manutenzione delle camere iperbariche *SafetyWeb*, basato sull'utilizzo di etichette "intelligenti" RFID (Radio Frequency Identification).

1. INTRODUZIONE

La gestione dei rischi di una camera iperbarica nell'ambito di una struttura ospedaliera, è un argomento complesso perché ogni attore facente parte del processo di gestione (fabbricante, medici, tecnici addetti alle terapie, personale infermieristico, direzione tecnica ospedaliera, responsabile ed addetti alla manutenzione etc.) in generale l'interlocutore, attribuisce un valore diverso alla probabilità che si verifichi un danno che potrebbe derivare dall' esposizione ad un pericolo.

Come noto il concetto di rischio ha due componenti:

a) la probabilità che si verifichi il danno, ovvero, con che frequenza può verificarsi il danno;

b) le conseguenze di tale danno, ovvero, di che gravità potrebbero essere.

L'accettabilità di un rischio per l'interlocutore è influenzata da tali componenti e dalla sua *percezione del rischio*. Tra i fattori che incidono sulla percezione dei rischi, figura lo stato di salute effettivo e percepito del paziente prima e dopo l'applicazione di una procedura clinica utilizzante il dispositivo medico. La percezione del rischio deve, quindi, considerare il fatto che l'esposizione ai rischi residui che il dispositivo presenta, è diretta a un gruppo di persone vulnerabili quali per l'appunto i pazienti.

Per le camere iperbariche, e per i dispositivi medici in generale, si parla di *processo di gestione del rischio* in quanto la valutazione e la gestione dei rischi non si esauriscono con l'illustrazione da parte del fabbricante dei rischi residui, bensì considera anche la fase di post-produzione; il fabbricante deve recepire le informazioni emerse durante l'utilizzo (inconvenienti, rischi non valutati dal fabbricante per pazienti affetti da particolari patologie, etc..) per poi "immetterle" come input per una rivalutazione degli stessi. In altri termini il fabbricante, nell'ambito della sorveglianza post-vendita dei dispositivi medici prevista dal D. Lgs. 46/97, di recepimento della direttiva Dispositivi Medici, deve monitorare l'utilizzo del dispositivo raccogliendo informazioni che permettano la valutazione delle circostanze e delle eventuali problematiche legate all'utilizzo dei dispositivi medici. La raccolta di dati sulla qualità del prodotto e sul suo corretto utilizzo permette di attuare le azioni preventive e correttive finalizzate al miglioramento della sicurezza degli utenti e delle performance terapeutiche.

Nella figura sono rappresentate le varie fasi del processo di gestione del rischio (1 ÷ 13), schematizzabile nei seguenti tre passaggi fondamentali:

1) analisi dei rischi;

2) valutazione dei rischi;

3) controllo dei rischi;

4) informazioni post-produzione.

Come noto le camere iperbariche, nell'ambito delle strutture saniatarie, sono dedicate all' Ossigeno Terapia Iperbarica, cioè quella terapia durante la quale si respira ossigeno in un ambiente chiuso in cui la pressione è superiore a quella atmosferica.

L'ossigeno, all'interno del corpo umano, è trasportato nel sangue da due vettori:

- emoglobina, dove è legato chimicamente (19.6 ml O2 / 100 ml di sangue)
- plasma, dove si trova disciolto (soluzione fisica di fluido e gas: 0,03 ml O2 /100 ml di sangue).

A pressione atmosferica respirando aria (21% ossigeno) l'emoglobina è satura di ossigeno al 97%; respirando ossigeno al 100% l'emoglobina si satura completamente e, vista la percentuale di partenza, si ha di fatto uno scarso incremento del gas trasportato. Aumentare la percentuale di Ossigeno nel sangue è dunque possibile solo aumentandone la solubilità nel plasma; ciò è realizzabile, essendo ossigeno e plasma legati in soluzione, aumentando la pressione esercitata sul liquido. Infatti (come descritto dalla legge di Henry sulla solubilità dei gas nei liquidi) la solubilità di un gas (ad es. ossigeno) in un liquido (ad es. plasma) è direttamente proporzionale all'aumentare della pressione esercitata sul liquido, al coefficiente di solubilità ed è inversamente proporzionale alla distanza che il gas deve percorrere per solubilizzarsi nel liquido. Ne deriva che la respirazione di ossigeno al 100% a pressione modificata (fino a 2 BAR relativi) consente il trasporto di oltre 6 ml O2 per 100 ml di plasma. In queste condizioni l'ossigeno disciolto sarà sufficiente a coprire le necessità metaboliche di base dell'organismo anche in assenza di emoglobina.

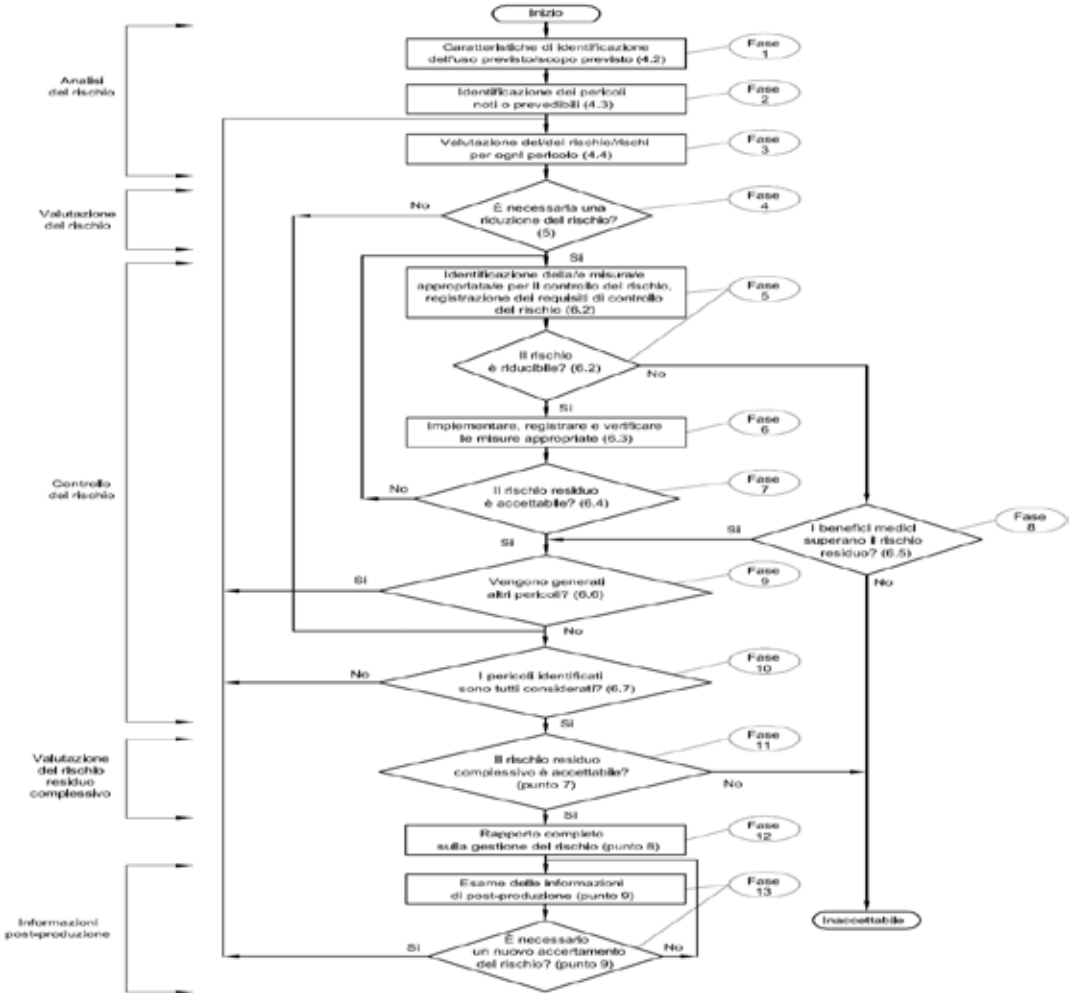


Fig. 1: Rappresentazione schematica del processo di gestione del rischio applicato ai dispositivi medici





fig. 2 Camera iperbarica

La gestione dei pericoli in una camera iperbarica ha sempre interessato e preoccupato gli specialisti del settore, sia costruttori, sia medici che tecnici; parliamo, infatti, di un ambiente confinato, di dimensioni variabili senza possibilità di fuga immediata, dove anche il più piccolo guasto o innesco può provocare conseguenze rilevanti. A titolo di esempio si riportano i risultati tipo della valutazione dei rischi di una camera iperbarica:

Pericolo o causa	Misura da adottare
Rapido decremento della pressione Rottura e/o guasto dei dispositivi di regolazione automatici e/o manuali	Assicurarsi sempre di effettuare manutenzione preventiva sui circuiti di scarico aria. Agire sulle intercettazioni di emergenza come riportato nel Manuale d'uso.
Incendio Fonti di innesco	Rispettare scrupolosamente le prescrizioni relative alla lista di materiali da non introdurre in Camera, monitorare costantemente eventuali innalzamenti di $\%O_2$ ed assicurarsi dell'efficienza dell'impianto antincendio, effettuare manutenzione come prescritto nel Manuale d'uso e manutenzione.
Guasto analizzatore $\%O_2$ Guasto elettronico, inquinamento cella, chiusura impropria del campionamento. etc	Assicurarsi sempre di effettuare la manutenzione preventiva ed il controllo periodico di taratura dell'analizzatore.
Guasto trasduttore di pressione Guasto elettronico, rottura tubo prelievo, chiusura impropria del campionamento.	Assicurarsi sempre di effettuare la manutenzione preventiva ed il controllo periodico di taratura del trasduttore.

Per la tutela della salute dei soggetti coinvolti nelle attività sanitarie, i dispositivi medici commercializzati in Italia devono recare la marcatura CE ai sensi della Direttiva 93/42/CEE, recepita dal D. Lgs. 24 febbraio 1997 n. 46, a dimostrazione del rispetto delle norme di sicurezza.

Il processo di gestione dei rischi connessi con l'uso di tali dispositivi, ricade sul fabbricante ma anche sui responsabili delle strutture sanitarie per gli usi difformi da quelli previsti e per la conservazione delle prestazioni dei dispositivi nel tempo. A causa del possibile deterioramento delle prestazioni legato all'uso, l'affidabilità e la sicurezza dei dispositivi devono essere tenute costantemente sotto controllo, secondo quanto previsto negli standards richiamati dalla citata direttiva.

2. ASPETTI GESTIONALI

Nelle aziende sanitarie la gestione della sicurezza è alquanto complessa; in particolare la gestione delle attrezzature sanitarie è parte di un sistema complessivo di gestione, attuato da un apposito servizio di Ingegneria che, in molte aziende sanitarie, viene denominato "*Servizio di Ingegneria Clinica*". Tale servizio è incaricato della valutazione tecnica riguardo l'installazione dei dispositivi medici, i collaudi, le verifiche periodiche e la manutenzione relative agli stessi. Le risorse e gli apprestamenti impiantistici necessarie per l'installazione, quali l'impianto elettrico, l'impianto antincendio, l'impianto di condizionamento etc., vengono, in genere, gestiti dall'Ufficio Tecnico della Struttura Sanitaria. L'igiene e la sicurezza dei luoghi di lavoro, la gestione delle emergenze, la formazione e l'informazione del personale contro i fattori di rischio presente negli ospedali, la dotazione dei dispositivi di protezione individuale e quant'altro, vengono invece gestiti dal Servizio di Prevenzione e Protezione.

Quanto al "collegamento", nell'ambito dell'organigramma aziendale per la gestione della sicurezza, dei suddetti tre Servizi dell'azienda sanitaria, questi si devono interfacciare con un

continuo scambio di informazioni in occasione dell'installazione di una camera iperbarica, in merito ad esempio ai fabbisogni formativi degli operatori, alla segnaletica di sicurezza, alle procedure d'emergenza, alla circostanza di lavori in corso da parte di ditte esterne, e sopratutto alle dotazioni strutturali e impiantistiche ospedaliere necessarie, in particolare:

- compatibilità con le caratteristiche strutturali dei locali di installazione,
- compatibilità con la destinazione d'uso dei locali di installazione,
- disponibilità di un impianto di alimentazione elettrica adeguato,
- disponibilità di un trasformatore di isolamento adeguato,
- disponibilità di un gruppo di continuità adeguato,
- disponibilità di un impianto di condizionamento adeguato,
- disponibilità di un impianto di alimentazione idrica adeguato,
- disponibilità di un impianto gas medicali adeguato,
- disponibilità di un impianto trasmissione dati adeguato,
- disponibilità di sistemi di evacuazione adeguati,
- disponibilità di dispositivi di protezione individuali adeguati
- implementazione di procedure di emergenza.

3. PROBLEMATICHE DI INSTALLAZIONE ED APPRESTAMENTI IMPIANTISTICI

Una corretta installazione ed una efficace gestione della sicurezza di una camera iperbarica, richiede una serie di risorse ed apprestamenti impiantistici forniti dalla Struttura Sanitaria destinataria, tra i quali i più importanti ricordiamo l'impianto elettrico, l'impianto di distribuzione dei gas medicali, nonché gli apprestamenti necessari per il funzionamento del sistema antincendio. In particolare devono essere valutate:

- tutte le caratteristiche dei componenti e impianti elettrici che possono avere effetti nocivi sugli altri componenti elettrici o sugli altri servizi o che siano tali da compromettere il funzionamento della sorgente elettrica;
- la frequenza e la qualità della manutenzione che si può ragionevolmente prevedere nel corso della vita prevista dell'impianto;
- la accessibilità ai componenti elettrici sia per quanto riguarda le operazioni di manutenzione sia per quanto riguarda possibili situazioni di emergenza.

3.1. Alimentazione elettrica

Per l'alimentazione delle utenze privilegiate degli ospedali, quali le camere iperbariche, essenziali in ragione delle prestazioni che forniscono, è necessario prevedere una seconda sorgente di alimentazione: l'alimentazione "di emergenza" (ridondante), che interviene in caso di mancanza della rete primaria. Il tempo di intervento della sorgente di sicurezza deve essere non superiore a 15 secondi. La CEI 64-8/2 definisce due diverse tipologie di alimentazione di emergenza: alimentazione di sicurezza e l'alimentazione di riserva. L'alimentazione di sicurezza garantisce l'erogazione di energia elettrica alle utenze privilegiate in caso di mancanza di alimentazione ordinaria, al fine di garantire la sicurezza delle persone. L'alimentazione di riserva compie lo stesso servizio, ma per esigenze diverse dalla sicurezza delle persone.

Le sorgenti di sicurezza di classe 15 devono intervenire quando la tensione di alimentazione ordinaria nel quadro di distribuzione principale (e qui che viene solitamente predisposto il dispositivo di commutazione) scende, in uno o piu conduttori, di oltre il 12% del valore nominale, per un tempo ≥ 3 secondi.

L'autonomia di 24 ore può essere ridotta fino ad un minimo di 1 ora, se le attività mediche lo consentono e se si ritiene possibile che si possa effettuare un'evacuazione completa di tutti i locali che la sorgente serve, entro 1 ora. L'alimentazione di sicurezza con classe 15 di continuità è solitamente ottenuta tramite un gruppo elettrogeno. Il gruppo infatti partendo da fermo, in dipendenza delle proprie caratteristiche tecniche (ad es. il tipo di motore endotermico utilizzato) dall'istante in cui viene avviato impiega un determinato lasso di tempo prima di raggiungere la condizioni di regime e quindi essere in grado di sopportare un carico. Nel caso in esame tale tempo deve mantenersi entro i 15 secondi.

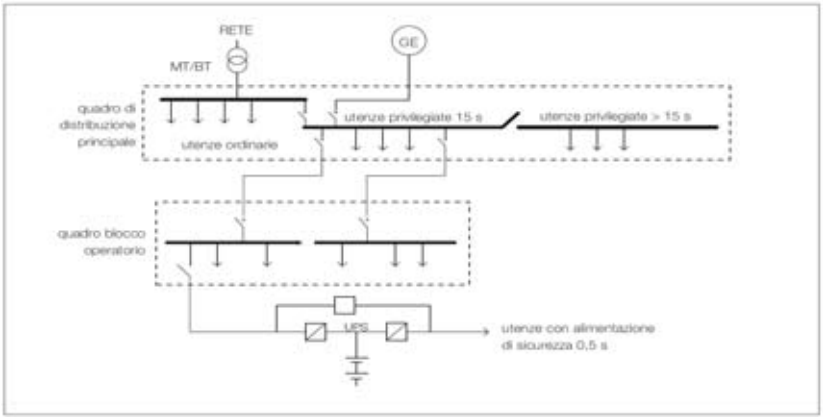


fig. 3: esempio di connessione delle sorgenti di sicurezza di classe 0,5, 15 e > 15

4. LA GESTIONE DELLE MANUTENZIONI

L'attività di manutenzione delle tecnologie biomediche sta evolvendo da una concezione di pura operatività (il ripristino delle apparecchiature non funzionanti) verso una vera e propria funzione manageriale volta alla riduzione dei rischi connessi all'uso dei dispositivi medici, alla diminuzione dei tempi di inutilizzo, alla prevenzione dei guasti ed alla garanzia della qualità delle prestazioni erogate.

L'obbligatorietà della manutenzione è rilevabile dalla lettura della seguente normativa:

- Art. 15, comma 1 del D.Lgs 81/08: "*Le misure generali di tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori nei luoghi di lavoro sono (...) la regolare manutenzione di ambienti, attrezzature, macchine ed impianti ...*".
- Art. 71, comma 4 del D.Lgs 81/08: "*Il datore di lavoro prende le misure necessarie affinché le attrezzature di lavoro siano installate ed utilizzate in conformità alle istruzioni d'uso oggetto di idonea manutenzione al fine di garantire nel tempo la rispondenza ai requisiti di sicurezza di cui all'art. 70 e siano corredate, ove necessario, da apposite istruzioni d'uso e libretto di manutenzione*".
- Paragrafo "*Gestione delle risorse tecnologiche" del DPR 14 gennaio 1997: "Deve esistere un piano per la manutenzione ordinaria e straordinaria delle apparecchiature biomediche; tale piano deve essere documentato per ciascuna apparecchiatura e reso noto ai diversi livelli operativi*"....
- Art. 3 del D. Lgs. 46/97: "*I dispositivi possono essere immessi in commercio o messi in servizio unicamente se rispondono ai requisiti prescritti dal presente decreto, sono correttamente forniti e installati, sono oggetto di un'adeguata manutenzione e sono utilizzati in conformità della loro destinazione*".
- All. I, punto 13.6 del D. Lgs. 46/97: "*Le istruzioni per l'uso devono contenere.... d) tutte le informazioni che consentono di verificare se un dispositivo è installato correttamente e può funzionare in maniera adeguata e sicura, nonché le informazioni riguardanti la natura e la frequenza delle operazioni di manutenzione e di taratura necessarie per garantire costantemente il buon funzionamento e la sicurezza del dispositivo*".

Quanto alle definizioni di manutenzione, per la fattispecie dei dispositivi medici, si riportano i dettami della norma CEI 62-122.

Manutenzione:

Combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o a riportare un dispositivo medico in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta.

Manutenzione preventiva:

Manutenzione eseguita ad intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti e volta a ridurre la probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di un dispositivo medico.

Manutenzione correttiva:
Manutenzione eseguita a seguito della rilevazione di una avaria e volta a riportare un'entità nello stato in cui essa possa eseguire una funzione richiesta.
Verifica:
Atto inteso a garantire un livello di sicurezza accettabile, costituito sia da tutti quei controlli visivi dello stato di integrità dell'apparecchiatura che dall'individuazione e misura di uno o più parametri.

4.1. Strategie manutentive

Le strategie implementate per l'ottimizzazione dell'attività manutentiva sulle tecnologie biomediche in generale, raggiungono piena efficacia solo in presenza di una struttura di controllo e monitoraggio che, quasi in tempo reale, possa valutare effettivamente il rispetto delle condizioni pattuite con i manutentori e/o gli indicatori di performance. A tal fine fattore indispensabile è la centralizzazione delle chiamate tramite modulo WEB o Call Center e la verifica sistematica della congruità quali-quantitativa degli interventi di manutenzione.

Il piano della manutenzione preventiva e correttiva è predisposto dalla struttura sanitaria, per il tramite del Servizio di Ingegneria Clinica, attraverso una pianificazione dettagliata dei metodi e dei mezzi (personale, laboratori, strumentazione, eventuali contratti di manutenzione con ditte esterne, ecc), nonché degli strumenti di controllo dell'attività manutentiva (p.e gestione informatizzata dei dati manutentivi mediante software dedicati). Per la corretta gestione del piano della manutenzione deve essere identificato un responsabile per ciascuna struttura organizzativa e deve essere definita una guida ed una modulistica idonea per la richiesta degli interventi di manutenzione (per rilevazione anomalia) al servizio tecnico.

La documentazione tecnica, obbligatoriamente fornita al momento dell'acquisto, deve essere a corredo dello strumento in maniera che sia facilmente rintracciabile dal responsabile della manutenzione.

Tutti gli interventi di manutenzione sia essa preventiva che correttiva sulle camere iperbariche, e sulle apparecchiature biomediche in generale, devono essere documentati da un rapporto tecnico dettagliato. Per ogni apparecchiatura deve esistere una cartella (cartacea o elettronica) la quale riporti tutti i dati significativi relativi ad ogni intervento di manutenzione subito; in particolare le schede per la manutenzione preventiva devono documentare la programmazione e la regolarità degli interventi effettuati. Le schede per la manutenzione correttiva devono registrare i dati idonei all'elaborazione di alcuni indicatori (tra i quali necessariamente: il tempo di intervento, il tempo di risoluzione del guasto, il tempo medio di fermo macchina, la frequenza dei guasti, la distribuzione della tipologia di guasto, i costi di manutenzione, il tipo ed il costo delle parti di ricambio), attraverso i quali sia possibile analizzare la situazione del parco tecnologico nel suo complesso e per singole tipologie di apparecchiature.

5. IL SISTEMA SAFETYWEB DELLA SISTEMI IPERBARICI

5.1. Il Sistema SafetyWeb

SafetyWeb è un sistema per la gestione della manutenzione che si basa sull'utilizzo di etichette "intelligenti" RFID (Radio Frequency Identification) che è stato concepito per superare le limitazioni sopra indicate.

Esso è costituito da:

- Un portale accessibile da internet ai vari utenti del sistema (gestore della manutenzione, tecnici, utenti finali) con un meccanismo di username e password .
- Terminali portatili (palmari industriali) a disposizione dei tecnici che effettuano gli interventi di manutenzione
- Etichette RFID fisicamente installate sui componenti critici dell'impianto

5.2. La tecnologia RFID (Radio Frequency Identification)

La tecnologia RFID (Radio Frequency Identification) è una recente innovazione, destinata a sostituire i vecchi codice a barre.

Sono delle “etichette” di varia forma e dimensioni che possono memorizzare al loro interno delle informazioni, sono racchiuse in diversi contenitori a seconda dell’applicazione: in contenitori plastici ermetici, all’interno di etichette adesive, su film plastici flessibili, etc.

I dati possono essere letti/scritti da un PC o un Palmare equipaggiati da opportuni dispositivi di interfaccia. I dati, inoltre, restano memorizzati sulla etichetta per almeno 10 anni.

Le etichette sono sottilissime (circa 1 mm di spessore) e non sono dotate di alcuna batteria: sono semplicemente attivate nel momento in cui vengono lette o scritte, la distanza di lettura/scrittura è di circa 10 cm. Di seguito l’esempio di etichettatura di una camera iperbarica:

5.3. Descrizione del sistema

Il flusso delle informazioni è schematizzato nella figura seguente:



Fig. 4 – Schema di principio

5.3.1. Il portale web

Tutti gli utenti abilitati possono accedere, tramite una qualunque connessione internet, al portale www.safety-web.it. Tale portale rappresenta il centro di controllo di tutto il sistema, esso comprende le funzionalità illustrate di seguito.

5.3.1.1. Definizione del perimetro impiantistico

L’amministratore del sistema, in fase di progettazione della manutenzione, definisce:

- Le operazioni di Manutenzione
- Le tipologie di Componenti
- I piani di manutenzione, indicando, per ogni tipologia di componente, la periodicità delle diverse operazioni.

5.3.1.2. Definizione dell’anagrafica di impianto

Definito il perimetro impiantistico, è possibile codificare l’anagrafica dell’impianto oggetto di manutenzione. Il livello di dettaglio dell’anagrafica viene definito dal gestore della manuten-

zione in fase di prima implementazione. Si tratta di una operazione particolarmente delicata in quanto è alla base della rintracciabilità degli interventi e delle statistiche di guasto.

Il sistema SafetyWeb consente di gestire l'anagrafica mediante una struttura ad albero liberamente definibile dall'utente. Ad ogni componente sono associate delle informazioni di base (tipo, marca, modello, etc) ed altre liberamente definibili dall'utente (es. pressione di esercizio, volume, potenza, etc,).

Ad ogni componente viene associata una etichetta RFID ed una etichetta cartacea entrambe fisicamente agganciate al componente.



Fig. 5 – Etichettatura di un componente

5.3.1.3. Gestione degli interventi

Una sezione del portale consente la gestione degli interventi manutenzione.

In particolare è possibile:

La consultazione degli interventi di manutenzione ordinari e straordinari come ricevuti dal palmare portatile. Un rapporto di intervento è composto da:

- o Una intestazione con identificazione dell'impianto, del numero e della data, degli operatori coinvolti e della durata.
- o Una sezione dedicata alle check-list manutentive per ogni singolo componente ove, per ogni operazione, viene indicato l'esito, il materiale sostituito ed un campo note.
- o Una sezione contenente il riepilogo dei materiali utilizzati.

La Gestione della pianificazione della manutenzione sulla base di piani di manutenzione programmati. La programmazione dei nuovi interventi avviene automaticamente alla ricezione di un intervento e può essere successivamente modificata dall'utente.Ogni operazione di manutenzione in scadenza o scaduta genera eventi ed allarmi che comportano:

- L'inserimento di tali operazioni in una maschera di "Eventi in scadenza/scaduti" che viene automaticamente visualizzata al momento del login.
- La generazione di e-mail ed SMS verso il personale addetto alla effettuazione/controllo della manutenzione. I dati relativi agli interventi scaduti/in scadenza sono peraltro sempre disponibili sul palmare portatile.

La Gestione di report e consuntivi sulla attività di manutenzione.

5.4. Raccolta e registrazione dati in campo

Il tecnico che effettua l'intervento ha a disposizione un palmare portatile di tipo industriale, tutte le attività di manutenzione sono guidate dalla lettura/scrittura delle etichette RFID sui componenti.

In particolare, una volta agganciate le etichette ai singoli componenti, avvicinando il palmare al componente esso viene riconosciuto dal sistema e viene presentata all'operatore la check-list di manutenzione per quel particolare componente. Vengono anche rilevate le ultime operazioni

di manutenzione effettuate e questo consente di segnalare all'operatore le operazioni scadute o in scadenza. L'operatore compila la check-list di manutenzione sul palmare, al termine gli viene richiesto di riavvicinare il palmare all'etichetta per la registrazione dei dati. A questo punto l'operatore può ripetere l'operazione su un nuovo componente, al termine il rapporto viene controfirmato elettronicamente dall'utilizzatore. Mediante una semplice connessione internet tutti i dati vengono inviati al portale ove sono immediatamente disponibili per la consultazione e la rendicontazione.

5.4.1. La funzionalità RFID

La presenza dell'etichetta RFID comporta i seguenti vantaggi:

- L'univoca identificazione del componente (come peraltro un tradizionale codice a barre)
- La registrazione delle ultime attività di manutenzione effettuate (per ogni operazione viene registrata la data, l'esito, e l'operatore) direttamente sul componente.

La manutenzione, pertanto, risulta registrata doppiamente, con un meccanismo di ridondanza:

- sul portale web
- nella etichetta RFID sul componente, ove, in caso di incidente o per ispezioni, può essere rilevata in modo indipendente dalle informazioni sul portale.

5.5. Conclusioni

Il sistema SafetyWeb è stato appositamente sviluppato per consentire una gestione della manutenzione più moderna, sicura ed efficiente. In particolare, sono evidenti i seguenti vantaggi:

- Perfetta rintracciabilità delle operazioni in accordo alla Norma UNI 10584 – "Sistemi di gestione della manutenzione"
- Responsabilizzazione dell'operatore e dell'azienda che effettua il servizio di manutenzione
- Possibilità di verifica in campo, in qualunque momento, dello stato di manutenzione di un componente, sulla falsa riga delle "Scatole Nere" utilizzate in campo aeronautico.
- Facilità di registrazione delle attività di manutenzione e drastica riduzione degli errori umani.
- Possibilità di Controllo delle attività di manutenzione da parte di tutti i soggetti coinvolti (fabbricante, azienda di manutenzione, utilizzatore finale)
- Tutti i vantaggi legati alla informatizzazione del processo di manutenzione (Report con materiali sostituiti, statistiche di guasti,etc.)

BIBLIOGRAFIA

[1] CEI UNI EN ISO 14971:2004 Medical devices: application of risk management to medical devices

[2] Raccomandazione n. 9 del settembre 2008 del Ministero del Lavoro, della Salute e delle Politiche Sociali

[3] UNI EN 14931:2006 "Camere Iperbariche multiposto per terapia iperbarica: prestazioni, requisiti di sicurezza e prove.

[4] Linea guida ISPESL – ottobre 1999: Gestione di camere iperbariche multiposto in ambiente clinico

[5] Monografico ISPESL - Gestire la sicurezza di impianti e tecnologie biomediche: proposte per l'innovazione tecnologica in ambito sanitario

[6] Comitato Elettrotecnico Italiano CEI. Guida alle prove di accettazione ed alle verifiche periodiche di sicurezza e/o di prestazione dei dispositivi medici alimentati da una particolare sorgente di alimentazione CEI 62-122; 2002-07.

[7] Comitato Elettrotecnico Italiano CEI. Apparecchi elettromedicali: Prescrizioni generali relative alla sicurezza fondamentale e alle prestazioni essenziali parte 1. CEI EN 60601-1; 2007.

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

La messa in servizio di una Camera Iperbarica nella Repubblica di San Marino

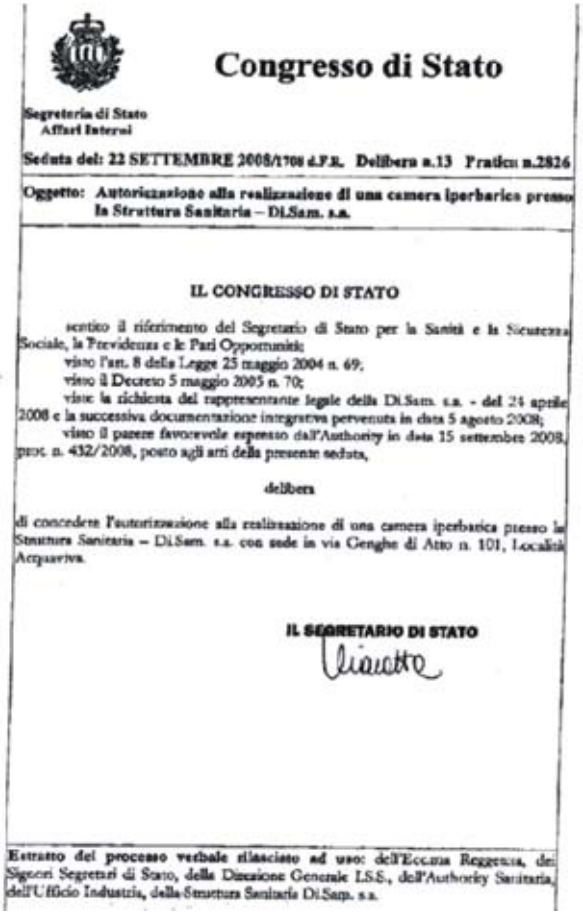
G. Sferruzza*
M. Godono**
**ISPESL PALERMO*
***Sistemi Iperbarici srl*

SOMMARIO

Le Direttive Europee, fissando i Requisiti Essenziali di Sicurezza (RES) di un determinato prodotto, rappresentano il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri nella specifica materia, lasciando però liberi i Paesi di decidere la strada da percorrere (cioè le norme di dettaglio) per ottenere l'obiettivo voluto. Queste forme legislative sono redatte secondo le regole del "nuovo approccio" ponendo particolare attenzione alla valutazione dei rischi e prevedono procedure particolari per l'immissione sul mercato e la messa in servizio. Tutte le direttive europee di prodotto prevedono, tra l'altro, l'introduzione di *organismi incaricati* di effettuare, in ambito comunitario, le verifiche in conformità ai requisiti previsti dalla specifica direttiva. Per i paesi comunitari è fatto obbligo l'adozione delle Direttive per gli altri paesi (non comunitari) queste possono rappresentare un punto di riferimento per valutare i requisiti di sicurezza di un determinato prodotto. Lo Stato di San Marino (paese non Comunitario all'interno del territorio Italiano) ha scelto, ai fini dell'autorizzazione all'accreditamento di un Centro Iperbarico sul proprio territorio, l'adozione di due direttive comunitarie la dir. 97/23/CE (PED) e la 93/42/CE (MED).



Lo sviluppo della medicina iperbarica (O.T.I. Ossigeno Terapia Iperbarica) e la scarsa diffusione territoriale, in funzione della domanda sanitaria, ha spinto il Consiglio di Stato della piccola Repubblica di San Marino a concedere l'autorizzazione alla realizzazione di una Camera Iperbarica presso la Struttura Sanitaria presente sul proprio territorio



Congresso di Stato

Segreteria di Stato
Affari Interni

Seduta del: 22 SETTEMBRE 2008/1708 d.F.R. Delibera n.13 Pratica n.2826

Oggetto: Autorizzazione alla realizzazione di una camera iperbarica presso la Struttura Sanitaria – Di.Sam. s.a.

IL CONGRESSO DI STATO

sentito il riferimento del Segretario di Stato per la Sanità e la Sicurezza Sociale, la Previdenza e le Pari Opportunità;
visto l'art. 8 della Legge 25 maggio 2004 n. 69;
visto il Decreto 5 maggio 2005 n. 70;
visto la richiesta del rappresentante legale della Di.Sam. s.a. - del 24 aprile 2008 e la successiva documentazione integrativa pervenuta in data 5 agosto 2008;
visto il parere favorevole espresso dall'Authority in data 15 settembre 2008, prot. n. 432/2008, posto agli atti della presente seduta,

delibera

di concedere l'autorizzazione alla realizzazione di una camera iperbarica presso la Struttura Sanitaria – Di.Sam. s.a. con sede in via Genghe di Atto n. 101, Località Acquaviva.

IL SEGRETARIO DI STATO

Estratto del processo verbale rilasciato ad uso: dell'Eccma Reggenza, dei Signori Segretari di Stato, della Direzione Generale I.S.S., dell'Authority Sanitaria, dell'Ufficio Industria, della Struttura Sanitaria Di.Sam. s.a.

La Camera Iperbarica è un dispositivo medico particolare in quanto oltre a rispondere alla Direttiva 93/42/CEE (MED), recepita in Italia con D.Lgs. n. 46 del 24.2.1997, risponde anche Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione (PED), recepita in Italia con D.Lgs. n. 93 del 25/02/2000. In Italia per la messa in servizio del dispositivo medico, oltre alle procedure previste dalla Direttiva Dispositivi Medici, è necessario attuare anche le procedure per la Messa in servizio delle Attrezzature a pressione come disposto dal D.M. n° 329 del 01.12.2004: Attuazione dell' Art. 19, comma 3 del D.Lgs del 25/02/2000.

La Repubblica di San Marino, nonostante non appartenga alla Comunità Europea, ha richiesto alla Struttura Sanitaria, autorizzata di dimostrare comunque il rispetto delle Direttive Europee ed inoltre ha posto come condizione necessaria alle autorizzazioni il rispetto del punto 5.1 delle Linee Guida ISPESL: "Verifica di esercizio - D.M. 21/5/1974", oggi "Messa in servizio secondo il D.M. 329".

Il Responsabile della Struttura Sanitaria, contattato il costruttore dell'apparecchiatura: Sistemi Iperbarici srl, ha attivato un processo di verifica secondo le procedure Italiane e che comunque rispettasse la Legge Nazionale del 28 ottobre 2005 n.148 della Repubblica di San Marino: "Disposizioni in materia di sicurezza degli impianti", promulgata dai Capitani Reggenti della Serenissima Repubblica di San Marino ed approvata dal Consiglio Grande e Generale nella seduta del 28 ottobre 2005. Infatti gli impianti a pressione sono inclusi in questa (punto h art. 1 – Ambito di applicazione):

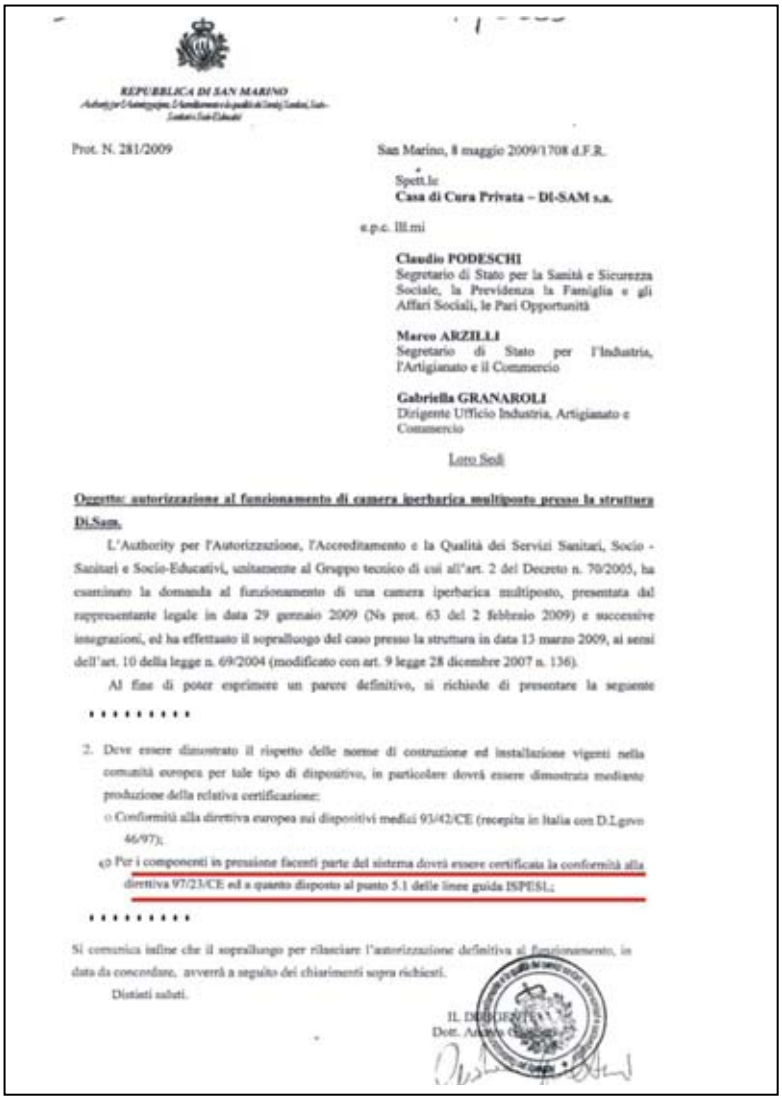
"Art. 1 - (Ambito di applicazione)

1. Sono soggetti all'applicazione della presente legge i seguenti impianti relativi agli edifici aventi qualsiasi destinazione d'uso, sia pubblici che privati, ivi compresi gli impianti installati in spazi aperti ed in cantieri:

.....

h. gli impianti a vapore ed a pressione per locali produttivi.

..... "



REPUBBLICA DI SAN MARINO

Prot. N. 281/2009

San Marino, 8 maggio 2009/1708 d.F.R.

Spett.le
Casa di Cura Privata – Di-SAM s.a.

e.p.c. Ill.mi

Claudio PODESCHI
Segretario di Stato per la Sanità e Sicurezza Sociale, la Previdenza la Famiglia e gli Affari Sociali, le Pari Opportunità

Marco ARZILLI
Segretario di Stato per l'Industria, l'Artigianato e il Commercio

Gabriella GRANAROLI
Dirigente Ufficio Industria, Artigianato e Commercio

Loro Sedi

Oggetto: autorizzazione al funzionamento di camera iperbarica multiposto presso la struttura Di.Sam.

L'Authority per l'Autorizzazione, l'Accreditamento e la Qualità dei Servizi Sanitari, Socio - Sanitari e Socio-Educativi, unitamente al Gruppo tecnico di cui all'art. 2 del Decreto n. 70/2005, ha esaminato la domanda al funzionamento di una camera iperbarica multiposto, presentata dal rappresentante legale in data 29 gennaio 2009 (Ns prot. 63 del 2 febbraio 2009) e successive integrazioni, ed ha effettuato il sopralluogo del caso presso la struttura in data 13 marzo 2009, ai sensi dell'art. 10 della legge n. 69/2004 (modificato con art. 9 legge 28 dicembre 2007 n. 136).

Al fine di poter esprimere un parere definitivo, si richiede di presentare la seguente

. . . . . .

2. Deve essere dimostrato il rispetto delle norme di costruzione ed installazione vigenti nella comunità europea per tale tipo di dispositivo, in particolare dovrà essere dimostrata mediante produzione della relativa certificazione:
   - Conformità alla direttiva europea sui dispositivi medici 93/42/CE (recepita in Italia con D.Lgsvo 46/97);
   - Per i componenti in pressione facenti parte del sistema dovrà essere certificata la conformità alla direttiva 97/23/CE ed a quanto disposto al punto 5.1 delle linee guida ISPESL;

. . . . . .

Si comunica infine che il sopralluogo per rilasciare l'autorizzazione definitiva al funzionamento, in data da concordare, avverrà a seguito dei chiarimenti sopra richiesti.

Distinti saluti.

IL DIRIGENTE
Dott. Andrea

Dopo diversi incontri avuti con l'Authority Sanitaria si arriva alla conclusione che per poter adempiere alle procedure di verifica previste dalla direttive 97/23/CE occorre ricorrere ad un Organismo Notificato e quindi la scelta ricade sull'ISPESL (in territorio italiano) .



CASA DI CURA PRIVATA
International Clinic

Strada Genghe di Atto, 101 - 47892 Acquaviva - RSM
Tel.: 0549 999 630 – Fax: 0549 999 648
E-Mail: info@internationalclinicofsanmarino.com

Data 09.02.2009

Spett.le ISPESL
Dipartimento di Certificazione e Conformità di
Prodotti ed Impianti - DCC
Via Alessandria
00198 - ROMA

Oggetto: Richiesta per la verifica di messa in servizio di un impianto iperbarico

Rif. Ns. RV/sv/EP38/E-Mail

In attuazione all'art. 19 del D.Lgs. n.93 del 25.02.2005 e secondo l'art. 4 del D.M. 329 del 01.12.2004 il **sottoscritto dott. Roberto VALDUCCI,** in qualità di legale rappresentante della **Casa di Cura Privata International Clinic** con sede nella Repubblica di San Marino, **richiede il Vs. intervento per le Verifiche relative alla successiva messa in servizio** dell'impianto iperbarico installato dalla Società Life Cure srl Div. Sistemi Iperbarici Integrati di Roma nei locali della Clinica.
L'impianto iperbarico si compone delle seguenti attrezzature a pressione (nessuna singola attrezzatura è operante in regime di scorrimento viscoso o sottoposta a fatica oligociclica):

N°	Denominazione	Fabbricante o Costruttore	PS [bar]	TS [°C]	Capacità [lt] o DN [mm]	Fluido gruppo	Cat.	Norma
1	Camera iperbarica 2000C	D.I.I. srl	6,5	-10 °C ÷ +60 °C	15400	1	IV	ISPESL
2	Autoclave antincendio	SICC	11,76	-10 °C ÷ +60 °C	500	2	III	ISPESL
4	Autoclave antincendio	ZANI	10,8	-10 °C ÷ +60 °C	2000	2	IV	Dir. 97/23/CE
5	Serbatoio aria	ZANI	11,76	-10 °C ÷ +60 °C	6000	2	IV	Dir. 97/23/CE
6	Serbatoio aria	ZANI	11,76	-20 °C ÷ +60 °C	6000	2	IV	Dir. 97/23/CE
7	Deumidificatore	ETHA	16	-20 °C ÷ +60 °C	INGIEME	2	III	Dir. 97/23/CE

L'apparecchiatura di cui al numero 7 è un insieme per il quale si denuncia la messa in servizio, gli accessori di sicurezza sono stati verificati dall'Ente Notificato all'atto del Collaudo dal Fornitore.
Si allegano i certificati delle apparecchiature in elenco e copia dei CND della Camera Iperbarica e del serbatoio da 500 lt relativi al controllo decennale.
Al fine di rendere più semplici le procedure per l'emissione dei relativi bollettini si comunica la nostra disponibilità ad accollarci direttamente gli oneri per il viaggio e soggiorno del Vs. Ispettore, Vogliate pertanto comunicarci le Vs. esigenze e provvederemo a nostro onere alla organizzazione.

IL LEGALE RAPPRESENTANTE
Dott. Roberto VALDUCCI

Il Dipartimento di Certificazione e Conformità di Prodotti ed Impianti DCC da mandato al Dipartimento di Palermo (la cui competenza in materia è dovuta anche alla presenza massiccia di impianti nel territorio) per l'effettuazione delle verifiche.

GESTIONE COLLAUDI

I collaudi iniziano quindi nei primi di Agosto del 2009 e sono durati un paio di giorni per la complessità delle opere da visionare. Lo schema delle verifiche ha ricalcato quanto previsto dal D.M. 329 del 1 dicembre 2004 e dalla specifica normativa di settore la UNI EN 14931 nel ri-

spetto comunque della Legge Nazionale n. 148 del 2005. Pertanto sono stati verificati tutti gli accessori di sicurezza dell'impianto (quali valvole di sicurezza ed altro) ma in modo particolare i dispositivi di controllo quali trasduttori di pressione, temperatura, umidità e di rilevazione della concentrazione di ossigeno in ambiente con la verifica delle logiche di interblocco e degli allarmi. Sono state eseguite le prove di funzionalità dell'impianto antincendio con la verifica della portata erogata dall'impianto. Particolare attenzione è stata rivolta anche alla verifica dell'impiantistica elettrica dei locali che ospitano il Centro Iperbarico, per questi infatti è stato richiesta la conformità alla norma CEI 64-8/7, considerando i locali di gruppo 2, e richiedendo la verifica periodica di sicurezza e funzionalità previste anche dalla normativa vigente nazionale San Marinese.

CONCLUSIONI

Quest'esperienza di messa in servizio di un impianto iperbarico, fuori dai confini nazionali, e basandosi su di una Linea Guida ormai datata, ma oggi supportata da un nuovo sistema normativo, dovrebbe spingere i Ministeri competenti ad una revisione ed una regolamentazione uniforme sul territorio nazionale di come debba essere svolta l'attività di messa in servizio di questa particolare tipologia di apparecchiature a pressione; a differenza di altre, queste hanno la peculiarità di contenere delle persone alle quali vengono somministrati delicati trattamenti terapeutici, pertanto l'attenzione non può essere rivolta a verificare solo aspetti legati prettamente alla stabilità dell'apparecchiatura ma ad un quadro completo dei dispositivi di controllo e gestione e non ultimo un esame attento degli impianti Ospedalieri a corredo.

BIBLIOGRAFIA

[1] D. Lgs. 9 aprile 2008 n. 81 e s.m.i. "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro".

[2] Norma UNI EN 14931 "Camere Iperbariche multiposto per terapia iperbarica".

[3] Linee Guida ISPESL - La gestione in sicurezza delle Camere Iperbariche multiposto in ambiente clinico.

[4] Legge Nazionale del 28 ottobre 2005 n.148 della Repubblica di San Marino: "Disposizioni in materia di sicurezza degli impianti".

[5] Norma CEI 64-8/7 "Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in c.a. e a 1500 V in c.c. – Ambienti ed applicazioni particolari";

[6] NFPA 99 "Standard for Health Care Facilities";.

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

Decreto legislativo 27 Gennaio 2010 Recepimento della direttiva quadro 2008/68/CE

*M. A. Pierdominici**
*E. Artenio**
**ISPESL DCC*

1. SOMMARIO

Alla luce delle norme di sicurezza stabilite dal decreto legislativo 81/2008, diventa conoscenza imprescindibile dei responsabili aziendali la corretta lettura ed applicazione dei disposti normativi previsti anche in ambito della gestione e del trasporto delle merci pericolose.

Tale affermazione è avvalorata dalla lettura dell'art.71 comma 1 che recita:

Il datore di lavoro mette a disposizione dei lavoratori attrezzature conformi ai requisiti di cui all'articolo precedente, idonee ai fini della salute e sicurezza e adeguate al lavoro da svolgere o adattate a tali scopi che devono essere utilizzate conformemente alle **disposizioni legislative di recepimento delle direttive comunitarie**.

In particolare la movimentazione in campo stradale e ferroviario di tutte le merci pericolose autorizzate al trasporto è disciplinata dai Regolamenti ADR (strada) e RID (ferrovia).

Il Parlamento Europeo ha definitivamente approvato la Direttiva Quadro 2008/68/CE del 24 settembre 2008 relativa al trasporto interno di merci pericolose.

La nuova direttiva modifica il quadro normativo riunendo in un unico provvedimento legislativo quattro direttive e due decisioni della Commissione relative al trasporto di merci pericolose ampliando il campo di applicazione con l'inserimento di norme comunitarie relative al trasporto fluviale oltre quelle concernenti il trasporto su strada e per ferrovia.

Le direttive 94/55/CE (recepimento ADR-trasporto stradale), 96/49/CE (recepimento RID-trasporto ferroviario), 96/35/CE e 2000/18/CE (Consulenti per la sicurezza) e le decisioni 2005/263/CE e 2005/180/CE sono state **abrogate dalla Commissione**.

La presente memoria si propone di analizzare i cambiamenti e le ricadute che il nuovo provvedimento e la edizione del nuovo Regolamento ADR hanno anche in ambito TPED.

2. TRASPORTO TERRESTRE IN AMBITO EUROPEO

Attualmente il trasporto terrestre interno di merci pericolose è disciplinato in Europa dai Regolamenti:

ADR (strada)

RID (ferrovia)

ADN (vie navigabili interne).

In Italia l'adozione ufficiale dei Regolamenti sopraindicati è avvenuta per il tramite del Decreto Legislativo 27 gennaio 2010, n.35 pubblicato sulla G.U. n.58 in data 11 marzo 2010 ma le edizioni 2009 dell' ADR e del RID si applicano ai trasporti internazionali dal 1 Gennaio 2009.

Con il recepimento della Direttiva Quadro 2008/68/CE relativa al trasporto interno di merci pericolose si è concluso il lungo processo di allineamento della normativa nazionale a quella internazionale infatti l'applicazione del Regolamento ADR in Italia risale al 12 febbraio 1963 con

la promulgazione della Legge 12.08.1962, n. 1839 "Notifica dell'Accordo ADR, con annessi Protocollo e Allegati, adottato a Ginevra il 30 settembre 1957".

Di seguito si riporta una sintesi dell'applicazione dell' ADR in ITALIA:

- Art.168 Nuovo codice della Strada D.Lgs. 30.04.1992, n. 285.
- D.M. 04109/1996 recepimento direttiva 94/55/CE (ADR ed.1995);
- D.M. 03.03.1997 recepimento direttiva 95/50/CE, riguardante procedure uniformi in materia di controlli su strada di merci pericolose;
- D.M. 15.05.1997 recepimento direttiva 96/86/CE (ADR ed.1997);
- D.M. 28.09.1999 recepimento direttiva 99/47/CE (ADR ed.1999);
- D.Lgs 04.02.2000 recepimento direttiva 96/35/CE, riguardante il consulente per la sicurezza del trasporto di merci pericolose su strada e su ferrovia;
- D.M. 21.12.2001 recepimento della direttiva 2001/7/CE (ADR ed. 2001);
- D.M. 06.06.2002 pubblicazione del testo consolidato dell'ADR 2001;
- D.M. 20.06.2003 recepimento della direttiva 2003/28/CE del 7.4.2003 (ADR ed. 2003), Gazzetta Ufficiale n. 156 dell' 8 luglio 2003;
- D.M. 02.09.2003 pubblicazione del testo consolidato dell'ADR 2003;
- D.M. 20.09.2005 recepimento della direttiva 2004/111/CE del 9.12.2004 (ADR ed. 2005).
- D.M.03.01.2007 recepimento Direttiva 2006/89/CE del 3 novembre 2006 che adatta per la sesta volta al progresso tecnico la direttiva 94/55/CE.

Tale applicazione è riferita al trasporto di tutte e nove le classi di merci pericolose e non esclusivamente a quelle della classe 2 cui fa univoco riferimento la direttiva TPED (salvo talune eccezioni).

3. DIRETTIVA QUADRO

La Direttiva Quadro 2008/68/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 24 Settembre 2008 relativa al Trasporto interno di merci pericolose è stata pubblicata su G.U. UE serie L numero 260 del 30.9.2008. Essa sostituisce le seguenti direttive:

- **Direttiva 94/55/CE** adottata dall'Italia con D.M. 4 Settembre 1996, relativa all'adozione del Regolamento ADR
- **Direttiva 96/49/CE** adottata dall'Italia con D.Lgs. 13 Gennaio 1999, n.41 relativa all'adozione del Regolamento RID

con un'unica Direttiva comprendente anche le disposizioni applicabili al **Trasporto mediante vie navigabili interne (ADN)**.

Le Direttive relative al Consulente Sicurezza Trasporti (**Direttiva 96/35/CE** e **Direttiva 2000/18/CE** adottate dall'Italia rispettivamente con D.Lgs. 4 Febbraio 2000, n.40 e D.M. 6 Giugno 2000 successivamente modificato con D.M. 10 Giugno 2004) sono abrogate dalla Direttiva Quadro.

L'abrogazione delle Direttive CE relative a Strada, Ferrovia e Consulente Sicurezza Trasporti è cogente dal Giugno 2009 termine entro il quale gli Stati membri dovevano mettere in vigore le disposizioni legislative, regolamentari e amministrative per conformarsi alla Direttiva Quadro.

La Direttiva Quadro 2008/68/CE prevede nell'Allegato I ADR (punto 2, comma 2) e Allegato II RID (punto 3, comma 2) che "gli Stati membri possono autorizzare, sul loro territorio, l'utilizzo di cisterne e veicoli costruiti anteriormente al 1° gennaio 1997 che non sono conformi alla presente direttiva, ma sono stati costruiti secondo le disposizioni nazionali in vigore al 31 dicembre 1996, sempre che le cisterne e i veicoli in questione siano mantenuti in condizioni atte a garantire i livelli di sicurezza richiesti.

Le cisterne e i veicoli costruiti a decorrere dal 1o gennaio 1997 che non sono conformi alla presente direttiva ma sono stati costruiti secondo le prescrizioni della direttiva 94/55/CE, in vigore alla data della loro costruzione, possono continuare a essere utilizzati per operazioni di trasporto nazionale.

In attuazione dei disposti di quanto sopra il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ha

promulgato il Decreto 18 febbraio 2010 (Gu 12 marzo 2010 n. 59)

"Autorizzazione alla circolazione nazionale di veicoli e cisterne adibiti al trasporto su strada di merci pericolose, costruiti anteriormente al 1° gennaio 1997, in attuazione dell'articolo 10, comma 1, del decreto legislativo 27 gennaio 2010, n. 35"(integralmente riportato in appendice) e **si prepara ad emanare un provvedimento simile per le cisterne ferroviarie attualmente allo studio nelle Sedi Competenti**.

In particolare l'adozione ufficiale del Regolamento ADR 2009 apporta talune novità rispetto alla vecchia edizione del 2007 tra le quali si ritiene utile riportare di seguito una sintesi delle principali riassunta per "parti":

Parte 1: Disposizioni generali: (definizioni; esenzioni; misure transitorie; consulente sicurezza trasporti; controlli amministrativi e procedure di valutazione cisterne e recipienti a pressione);

Parte 2: Classificazione: (rifiuti, fuochi pirotecnici, gas, perossidi organici, materie pericolose per l'ambiente acquatico-approccio GHS-;

Parte 3: Lista delle merci pericolose, omissis: Revisione Tabella A del capitolo 3.2 (disposizioni per l'imballaggi in comune e per le cisterne, numeri UN, disposizioni speciali, ecc.); regime "Quantità limitate"; regime "Quantità esenti";

Parte 4: Disposizioni relative alla utilizzazione degli imballaggi e delle cisterne: (cartucce per pile a combustibile, clorosilani, bromo, pitture e vernici, resine e inchiostri da stampa, gas, materie infettanti refrigerate, ecc.); riempimento minimo e massimo delle cisterne compartimentate; utilizzo ed esercizio delle MEMU;

Parte 5: Procedure di trasporto: documento di trasporto; marcature; disposizioni generali relative alla materie radioattive; pannelli di pericolo; numeri di identificazione del pericolo; istruzioni scritte; segnale di attenzione per veicoli, contenitore e cisterne che hanno subito un trattamento di fumigazione;

Parte 6: Prescrizioni relative alla costruzione di imballaggi, omissis: costruzione e prove per recipienti a pressione e per imballaggi di materie infettanti di Categoria A; aggiornamento tabelle norme "EN", come Codici tecnici di riferimento, per recipienti a pressione, cisterne, veicoli-batteria e CGEM; prova di vibrazione e pittogrammi di impilamento massimo per i GIR; marcatura delle cisterne;

Parte 7: Disposizioni concernenti le condizioni di trasporto, il carico lo scarico e la movimentazione: carico in comune (v. perossidi organici con etichetta 5.2+1 e 5.2, esplosivi da mina con alcuni nitrati); quantità massima trasportabile per perossidi organici e materie radioattive (limite unificato 20000 kg); nuove disposizioni (autorizzazioni, limiti quantitativi, modalità di carico, ecc.) per il trasporto di esplosivi mediante MEMU;

Parte 8: Prescrizioni generali relativi agli equipaggi, all'equipaggiamento, all'esrcizio dei veicoli e alla documentazione : equipaggiamento veicolo e DPI; certificato di formazione professionale del conducente (esenzione per le materie della Divisione 1.4, Gruppo di compatibilità S dall'obbligo del corso di specializzazione in esplosivi; CFP per i conducenti delle MEMU con specializzazione "esplosivi" o "cisterna" in relazione alle caratteristiche delle unità di trasporto); sorveglianza delle MEMU; riformulazione Codici di restrizione in galleria;

Parte 9: Prescrizioni relative alla costruzione e all'approvazione dei veicoli: inserimento, tra i veicoli soggetti a specifica approvazione, delle MEMU (nuovo Capitolo 9.8) che devono rispondere alle disposizioni previste per i veicoli EX/III.

Si sottolinea di nuovo che per i Paesi della Comunità Europea la valutazione di conformità, la rivalutazione di conformità e l'ispezione periodica dei recipienti adibiti al trasporto dei gas di cui alla classe 2 del Regolamento ADR sono disciplinati dalla direttiva 99/36/CE denominata TPED. Nel corso del corrente anno è prevista l'emanazione di una nuova direttiva TPED, ormai da lungo tempo allo studio, che ha lo scopo di adeguarsi al nuovo quadro normativo vigente e rendere la materia più omogenea e fruibile agli operatori del settore.

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

Proposta di una piattaforma RFID-based per la gestione delle verifiche di apparecchi a pressione

M.G. Gnoni - G. Lettera* - P. Tundo**
*A. Tonti** - A. Fiodo***

** Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione – Università del Salento*
*** Dipartimento Certificazione e Conformità dei Prodotti e Impianti – ISPESL*

1. SOMMARIO

La gestione delle ispezioni in sistemi industriali caratterizzati da un elevato livello di complessità deve bilanciare opportunamente sia interventi operativi che ripristino lo stato desiderato sia interventi conoscitivi che consentano di avere un quadro costantemente aggiornato degli asset critici all'interno di un impianto industriale. In sistemi complessi, quali ad esempio raffinerie, impianti chimici, etc., queste attività richiedono tradizionalmente un elevato livello di impiego di risorse sia da parte dei gestori degli impianti sia da parte degli enti pubblici di controllo; a ciò contribuiscono diversi fattori sia strettamente collegati all'impiantistica sia all'organizzazione dei controlli quali ad esempio l'elevata numerosità delle unità, degli apparecchi e della componentistica, il continuo aggiornamento della normativa, etc. L'obiettivo del presente lavoro è proporre un'analisi critica dell'applicazione della tecnologia RFID (Radio Frequency Identification) per un efficace supporto nell'ambito della programmazione e della gestione delle ispezioni degli apparecchi a pressione soggetti a creep. Pertanto, il sistema proposto supporterà l'attività ispettiva fornendo "on-site" tutte le informazioni relative all'apparecchiatura a pressione in esame ed al suo livello di sicurezza nel tempo; inoltre, consentirà di ottenere in modo efficace una gestione delle "certificazione" real-time del funzionamento delle apparecchiature cosi da ottimizzare il tempo totale richiesto in fase di controllo ed ispezione.

2. LE APPARECCHIATURE A PRESSIONE SOGGETTE A CREEP: PROBLEMATICHE OPERATIVE NELLE ISPEZIONI

Per le attrezzature a pressione che operano in regimi di funzionamento caratterizzati da temperature elevate, un parametro fondamentale di riferimento è la loro vita teorica di progetto, che è valutata in fase di progettazione in funzione delle sollecitazioni a cui l'attrezzatura sarà sottoposta durante il suo periodo di funzionamento. La vita teorica di progetto rappresenta il tempo d'esercizio previsto per il componente ed è definito dal progettista, entro i limiti ammessi dalla norma, prima di iniziare la progettazione; questo è un dato indispensabile per la progettazione se il componente è soggetto a meccanismi di danno tempo-dipendenti. Pertanto, nella determinazione della durata dell'attrezzatura si tiene conto delle condizioni di pressione e temperatura in cui si presume che l'attrezzatura stessa sia destinata a funzionare. Quindi, in regime di creep, fissata la temperatura, esiste una stretta ed univoca relazione tra sollecitazione applicata e tempo a rottura. Dall'altra parte, nella fase di esercizio, spesso accade che le condizioni definite in fase di progettazione non siano quelle reali di funzionamento: ad esempio, spesso può accadere che l'attrezzatura abbia funzionato in condizioni di pressione e temperatura più basse oppure il funzionamento potrebbe essere stato di tipo discontinuo determinando la necessità di un'analisi più specifica in relazione alla presenza effettiva di problemi legati alla

ciclicità dei carichi applicati. In linea generale, può accadere che la vita utile effettiva dell'attrezzatura risulta ampliata rispetto ai valori valutati in fase di progetto. Un ulteriore problematica è legata allo spessore del materiale utilizzato per realizzare le varie parti che compongono l'attrezzatura a pressione: può accadere che questo valore sia maggiore dello spessore nominale determinando così la presenza di un spessore addizionale che contribuisce a diminuire lo stato di stress; ciò contribuisce a fornire ulteriori ampliamenti alla vita dell'attrezzatura.

In questo ambito, risulta estremamente critica la fase di registrazione delle principali grandezze fisiche in fase di esercizio – in particolare la pressione e la temperatura – in quanto l'analisi dell'andamento effettivo di questi parametri può contribuire a modificare la vita dell'attrezzatura stimata in fase iniziale di progetto. Nel presente lavoro, si ipotizza di trascurare l'aspetto legato allo spessore e ad altre considerazioni di natura geometrica, in quanto si vuole focalizzare l'attenzione sulle condizioni fisiche di funzionamento, ovvero pressione, temperatura e durata di funzionamento; quest'ultimo parametro può essere chiaramente tenuto sottocontrollo tramite il parametro temperatura.

Nella fase di valutazione dei parametri critici sono coinvolti principalmente due "soggetti": l'utilizzatore finale dell'attrezzatura e l'Ente di Controllo che è responsabile delle ispezioni sulle attrezzature. Dal punto di vista dell'utilizzatore finale, l'aumento della vita utile dell'attrezzatura potrebbe rappresentare una riduzione dei propri costi operativi; dal punto di vista dell'Ente di Controllo, l'obiettivo è definire un sistema affidabile ed efficiente per la certificazione delle grandezze da monitorare prevedendo ad esempio la possibilità di lettura dei parametri da un supporto non accessibile se non a personale autorizzato. Generalmente, queste tipologie di impianti sono tenuti sotto controllo con sensori di temperatura e con manometri ed il tutto è riportato ad una centrale di controllo. La criticità è legata al fatto che gli impianti oggi in funzione dispongono di strumentazione di tipo non standardizzato per la lettura e la registrazione della pressione e temperatura in condizioni di esercizio; ciò può comportare dei problemi nella fase di certificazione dei dati registrati. Esistono attualmente delle proposte che si pongono l'obiettivo di fornire indicazione per la realizzazione di sistemi standard, in grado di garantire misure e registrazioni affidabili dei parametri, tenendo conto della criticità dei sistemi e delle attrezzature tenute sotto controllo, anche con l'obiettivo di non richiedere ridondanze inutili [1]. Una problematica ancora aperta è legata alla definizione di sistemi di registrazione dei dati di esercizio che devono essere *efficaci* (es. che consentano una registrazione in ambienti ostili), *affidabili* (es. non manipolabili da personale non autorizzato) ed *efficienti* (es. applicati in prossimità dell'attrezzatura) soprattutto per quanto riguarda il livello di temperatura di funzionamento.

3. LE TECNOLOGIE RFID E LA GESTIONE DELLE ISPEZIONI IN AMBITI COMPLESSI

I sistemi di identificazione basati sulla tecnologia RFID si stanno diffondendo rapidamente in diversi settori industriali. L' RFID è una tecnologia che usa le onde in radiofrequenza per trasferire i dati tra una antenna e un oggetto in movimento per identificare, tracciare e localizzare l'oggetto stesso; i componenti principali sono l'etichetta (i.e. tag o transponder) che va posizionato sull'oggetto da identificare, il reader che consente di rilevare le etichette, ed il software di comunicazione. In sintesi, i vantaggi che stanno contribuendo alla crescente diffusione di questa tecnologia, in particolare nelle attività di tracciamento dei beni e delle persone, sono che l'identificazione univoca di ciascun oggetto non richiede un contatto ottico o visivo per la lettura/scrittura (come ad esempio nel caso dei codici a barre). Inoltre, questa tecnologia risulta essere efficace anche in ambienti ostili (alte temperature, umidità, etc.) e consente di realizzare la lettura contemporanea di più codici [2]. L'applicazione di sistemi RFID-based nella gestione delle verifiche degli apparecchi a pressione può consentire di ottimizzare le attività di ispezione sia nella fase di preparazione delle stesse (p.e. consentendo una veloce identificazione dei componenti) sia nella fase di aggiornamento delle informazioni (p.e. esiti dei controlli non distruttivi, delle prove di pressione, etc.). Infatti, con una semplice lettura del tag applicato direttamente sul componente o sul macchinario è normalmente possibile ottenere la storia delle manutenzioni, verificare il ciclo di vita, ed infine gestire i ricambi in modo più efficiente. Inoltre, come ampiamente esposto in [3], la tecnologia attuale, grazie alla miniaturizzazione spinta dei componenti elettronici ed alla conseguente minimizzazione della potenza dissipata, permette

la realizzazione di tag RFID operati a batteria, sia di tipo attivo che semi-passivo, che tramite opportuni sensori (interni o esterni allo stesso tag) permettono il monitoraggio dei parametri fisici caratteristici dell'ambiente nel quale sono collocati. In [4] è proposto un sistema di supporto per l'ottimizzazione della manutenzione di componenti di un impianto di produzione di energia elettrica (i.e. le turbine a vapore). Il modello si basa sull'integrazione di un modello probabilistico per l'analisi dei guasti con un sistema dinamico di acquisizione delle informazioni realizzato grazie al posizionamento di un tag RFID all'interno del corpo della turbina. Il modello proposto ha consentito di aumentare l'efficienza delle turbine a vapore grazie ad una più efficace politica di manutenzione realizzata grazie alle informazioni acquisite tramite il sistema RFID; ciò ha permesso inoltre, di ottenere una riduzione dei costi totali connessi con queste attività. In [5] è proposta una piattaforma web-based innovativa per la gestione delle attività di gestione della conformità dei materiali nel settore delle costruzioni. Il sistema proposto è stato applicato ad un caso reale in cui i materiali da costruzione sono stati monitorati partendo dalla fase di laboratorio fino alla fase di esercizio in cantiere. I risultati hanno dimostrato una notevole riduzione del tempo necessario.

4. UNA PROPOSTA PER IL CONTROLLO DEI PARAMETRI OPERATIVI NELLE APPARECCHIATURE A PRESSIONE SOGGETTE A CREEP

Obiettivo principale del sistema proposto è definire un sistema efficace per registrare in maniera affidabile temperatura e pressione delle attrezzature a pressione che presentano particolari problematiche legate ai fenomeni di creep. Si propone un sistema in grado di acquisire e memorizzare localmente o in un database centrale remoto, per un tempo stabilito in base alla vita utile o residua dell'apparecchiatura o alla periodicità dei controlli, le grandezze fisiche di interesse (i.e. pressione e temperatura) delle apparecchiature critiche o gli istanti (o la numerosità) dell'attraversamento di soglie predeterminate per le stesse grandezze.

Le principali ipotesi dello studio proposto sono dettagliate di seguito:

- la registrazione dei dati è a cura dell'organismo di vigilanza, in modo parallelo a quella effettuata dall'utilizzatore finale con i sistemi di controllo di cui dispone;
- nel caso in cui siano già presenti dei sistemi di controllo dei parametri di processo, si utilizzano i sensori/trasduttori di pressione e temperatura e i relativi condizionatori/trasmettitori già esistenti sulle attrezzature critiche, collegando il sistema proposto immediatamente a valle degli stessi. In tal caso, per escludere ogni possibilità di introdurre disturbi nel segnale misurato dal sistema utente, il suddetto collegamento va sempre effettuato mediante opportuni isolatori/splitter ampiamente disponibili sul mercato della strumentazione industriale; alcuni isolatori/splitter sono inoltre in grado di provvedere alla conversione corrente-tensione del segnale di ingresso, permettendo una semplificazione del dispositivo che deve pertanto avere solo due ingressi analogici identici ad alta impedenza (i segnali disponibili sono infatti di natura analogica, normalmente una corrente variabile nell'intervallo 4-20 mA o una tensione variabile nell'intervallo 0-10 V);
- nel caso in cui non siano già presenti dei sistemi di controllo dei parametri di processo (oppure lo siano unicamente per una delle due grandezze fisiche di interesse) sarà necessaria l'installazione preventiva dei gruppi sensore/trasduttore e condizionatore a monte del sistema proposto.

Lo schema di massima del sistema proposto è rappresentato in Figura 1.

La logica di base del sistema proposto consente di garantire i requisiti di sicurezza caratteristici dei sistemi di monitoraggio come dettagliato di seguito:

> per quanto riguarda la dimensione "accuracy": il sistema proposto lascia invariato il livello del sistema di controllo già in uso, in quanto si utilizzano le catene di misura e condizionamento già esistenti;

> per quanto riguarda la dimensione "security": il sistema consente di ottenere un notevole miglioramento in quanto i dati registrati sono a disposizione dei soli utenti abilitati; in questo modo, il dato acquisito risulta essere certo.

> per quanto riguarda la dimensione "sicurezza funzionale": rispetto al sistema originario,

rimane invariata la sicurezza funzionale relativa alla catena di acquisizione e condizionamento, mentre possono esserci miglioramenti nella disponibilità dei dati monitorati, sia in termini del canale di comunicazione risultante tra sensore e database delle misure che in termini di lunghezza della "storia" disponibile per le misure stesse.

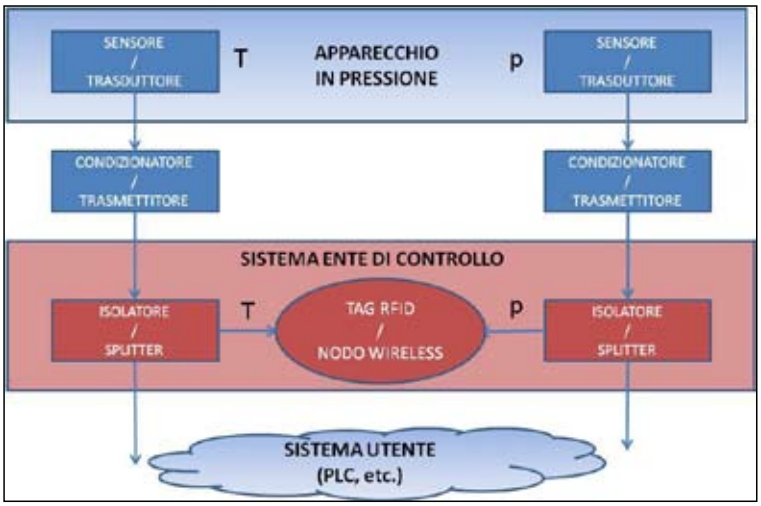


Figura 1: Schema di massima del sistema di monitoraggio proposto

Al fine di implementare a livello operativo la logica proposta in precedenza, sono descritte due soluzioni tecnologiche per il controllo dei parametri (temperatura e pressione) così definite:

1. ***Sistema di monitoraggio con memorizzazione locale basato su soglie prestabilite (RFID based)***: basato sull'utilizzo delle tecnologie RFID;
2. ***Sistema di monitoraggio con memorizzazione remota centrale*** basato sull'utilizzo di reti di sensori wireless.

Entrambe le soluzioni proposte prevedono un monitoraggio basato sul campionamento delle variabili di processo (temperatura e pressione); risulta quindi fondamentale la definizione della frequenza f di campionamento delle variabili al fine di definire l'efficacia del controllo.

Di seguito è proposta un'analisi critica delle due alternative progettuali: la prima basata sull'uso delle tecnologia RFID la seconda basata sull'utilizzo delle tecnologie di rete wireless. Obiettivo del confronto ed invidiare i punti di forza e di debolezza della proposta basata sull'applicazione RFID così da valutarne l'efficacia in modo completo.

Alternativa 1: Sistema di monitoraggio con memorizzazione locale basato su soglie prestabilite.

Il sistema proposto campiona la grandezza fisica di interesse e incrementa il contatore locale associato all'intervallo di misura, delimitato da due soglie successive, al quale appartiene il campione. La logica di funzionamento è riportata in Figura 2.

La dimensione fissa e limitata dei contatori rende possibile la memorizzazione locale delle suddette informazioni su un **tag RFID UHF di tipo attivo o semi-passivo**. Assumendo di riservare 24 bit per contatore e di avere un massimo di 7 soglie predefinibili, corrispondenti a 8 intervalli (Fig. 2), sono sufficienti 192 bit di memoria read/write per conteggiare più di 1,6x107 campioni per intervallo, corrispondenti per esempio ad un intervallo temporale di ben tre anni con un periodo di campionamento di soli 6 secondi. Lo spazio di memoria residuo dello stesso tag può essere utilizzato per l'archiviazione di altre informazioni utili, quali ad esempio il timestamp dell'ultimo campione, la vita residua calcolata dall'applicazione esterna, la matricola dell'operatore, ecc. I dati di conteggio rimangono all'interno del tag fino a quando non vengono scaricati da un operatore abilitato, dopodiché i contatori vengono azzerati e viene memorizzato sul tag il

timestamp di tale operazione, che pertanto rimane disponibile come data dell'ultima ispezione. L'operatore dell'ente di controllo è dotato di un palmare con idoneo reader RFID integrato (ISO 18000-7 o 18000-6 a seconda che si tratti di un tag attivo o semi-passivo). È pertanto possibile assicurare la leggibilità dei tag fino ad una distanza di 10 m circa, garantendo così l'accesso alle informazioni richieste anche quando il tag è collocato in posizioni difficili da raggiungere fisicamente. Il sistema proposto può essere esteso dotando il palmare di una connessione (es. 3G) a un sistema informativo remoto preposto all'archiviazione ed alla elaborazione dei dati delle ispezioni. Per l'operatore è pertanto possibile ottenere in tempo reale la vita residua calcolata ed ogni altro dettaglio relativo alle precedenti ispezioni per l'apparecchiatura in esame. Lo schema di funzionamento è riportato in Figura 3.

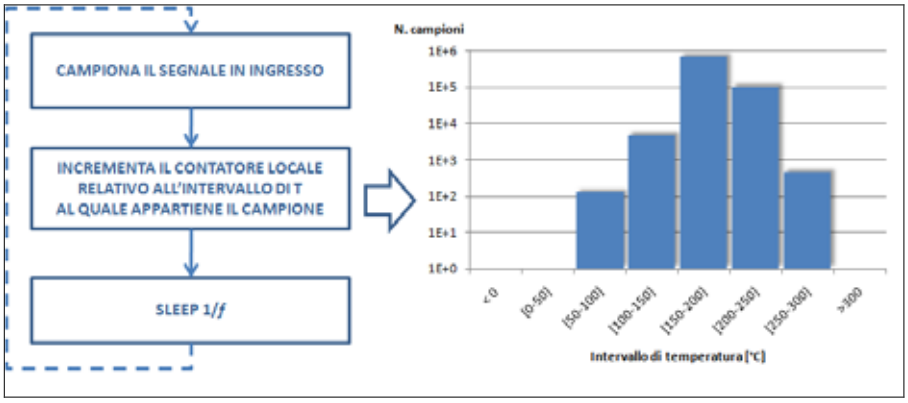


Figura 2: Ciclo di campionamento e aggiornamento contatori locali (sinistra) e risultati disponibili localmente (destra)

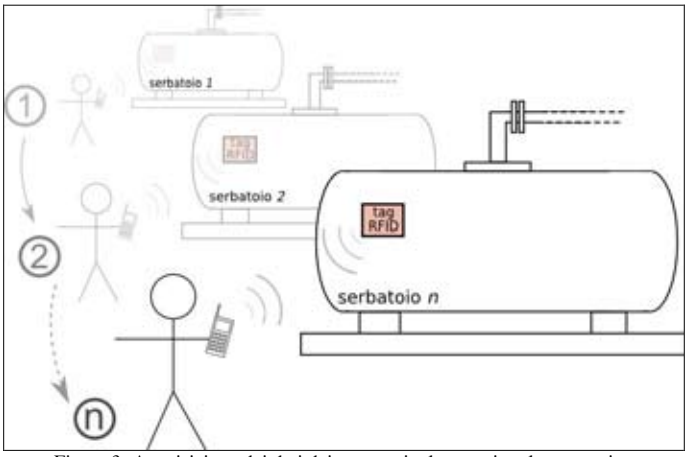


Figura 3: Acquisizione dei dati dai tag tramite letture singole successive

I principali vantaggi di questa soluzione sono:

- I dati scaricati sono pre-elaborati: il tempo di permanenza delle grandezze fisiche negli intervalli delimitati dalle soglie prestabilite può essere calcolato direttamente dal prodotto tra il numero dei campioni in ogni range ed il periodo di campionamento.
- I dati memorizzati sul singolo dispositivo hanno una dimensione molto limitata e pertanto il relativo scaricamento è istantaneo.

- Il malfunzionamento o il guasto della parte attiva del tag (accidentale o meno) non comporta la perdita dei dati memorizzati.

I principali svantaggi di questa soluzione sono:

- Prima di essere messo in opera sul campo, ogni singolo dispositivo deve essere pre-configurato (tramite apposito software) con i valori delle soglie da monitorare, che normalmente dipendono dalla particolare apparecchiatura monitorata; come ulteriore aggravante, tali soglie dipendono anche dal particolare sensore utilizzato, essendo questo normalmente esterno al dispositivo stesso.
- Il livello di security dell'accesso (lettura/scrittura/cancellazione) ai dati memorizzati nel dispositivo è commisurato alla potenza di calcolo del relativo microcontrollore (limitata nel caso di tag semi-passivo).
- Nel caso di grandi stabilimenti, l'operatore dell'ente di controllo deve visitare individualmente ciascun apparecchio sottoposto a monitoraggio per lo scaricamento dei dati memorizzati.
- Il malfunzionamento o il guasto della parte attiva del tag (accidentale o meno) non è rilevabile fino alla successiva ispezione.
- L'andamento delle grandezze misurate non è ricostruibile in modo completo: dato un intervallo di T/p, è unicamente possibile sapere globalmente per **quanto** tempo – ma non **quando** - la grandezza misurata è ricaduta in tale intervallo.

Alternativa 2: Sistema di monitoraggio con memorizzazione remota centrale

In questo caso la memorizzazione delle informazioni acquisite non avviene localmente a livello della singola attrezzatura ma le stesse sono trasferite in tempo reale, tramite la rete wireless che gli stessi dispositivi formano, ad una postazione fissa. La logica di funzionamento è riportata in Figura 4.

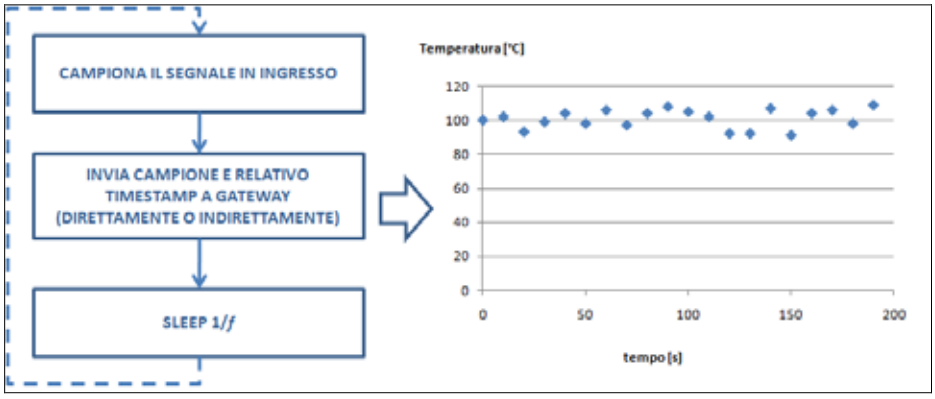


Figura 4: Ciclo di campionamento e trasferimento remoto del campione (a sinistra) e risultati disponibili centralmente (a destra)

Il sistema proposto è costituito da una **rete di sensori wireless** (wireless sensor network) operati a batteria, dove naturalmente resta inteso che il sensore nel senso proprio del termine è quello pre-esistente all'interno dell'apparecchiatura monitorata mentre il nodo della rete wireless viene collegato a valle della catena di condizionamento del segnale, eventualmente mediante isolatore/splitter, analogamente al caso precedente.

Un particolare nodo, definito gateway, è connesso ad un elaboratore centrale (es. un mini server) verso il quale tutti gli altri nodi inviano periodicamente le misure delle grandezze fisiche rilevate. In tal caso, potendo disporre di uno storage centralizzato di dimensioni ampie a piacimento su server (sono ampiamente disponibili memorie di massa di dimensioni dell'ordine di 1012 byte), i nodi non hanno bisogno di spazio di memorizzazione locale e le grandezze di

interesse possono essere campionate direttamente e memorizzate centralmente con un periodo di campionamento anche relativamente piccolo (dell'ordine dei secondi) e per periodi relativamente lunghi (anni). La rete ad-hoc auto configurante, che gli stessi nodi costituiscono, permette una ridondanza ed una tolleranza ai disturbi tanto più elevata quanto più alto è il numero di nodi che ne fanno parte, dal momento che ogni nodo può contribuire a trasmettere i messaggi inviati dall'origine alla destinazione finale attraverso qualsiasi numero di passaggi intermedi. Inoltre è possibile distribuire negli spazi dello stabilimento monitorato un certo numero di nodi "ripetitori", non collegati ad alcun sensore, che contribuiscano unicamente a migliorare l'affidabilità della comunicazione. In questo caso, i dati sono disponibili in formato grezzo in un unico punto: il database dell'elaboratore centrale. Lo stesso elaboratore potrebbe essere reso raggiungibile in maniera sicura via Internet per l'accesso remoto ai dati da parte dell'ente di controllo. Lo schema di funzionamento proposto è dettagliato in Figura 5.

I principali vantaggi di questa soluzione sono:

- Tutti i dati sono disponibili in un unico database centrale, per cui l'operatore dell'ente non ha bisogno di visitare individualmente le singole apparecchiature per acquisire i dati (e neppure lo stabilimento se il server locale è raggiungibile tramite Internet). Inoltre su tale server può essere installata l'applicazione di elaborazione dei suddetti dati, garantendo l'accesso immediato a dati riassuntivi, report sintetici, automatizzazione del computo della vita residua delle apparecchiature, ecc.
- I nodi non hanno bisogno di essere pre-configurati mediante soglie in quanto campionano direttamente i valori analogici in ingresso, quindi la fase di installazione è semplificata.
- Il livello di security dell'accesso ai dati memorizzati nel database centrale (lettura/scrittura/cancellazione) è molto elevato in quanto le risorse di calcolo di un comune server odierno consentono di mettere in atto le pratiche più efficaci per la protezione dei dati (accesso al sistema mediante certificati digitali, file system crittografati ecc.).
- È possibile predisporre opportunamente nello spazio dello stabilimento dei nodi "ripetitori" per migliorare l'affidabilità della rete o per mettere in comunicazione sottoreti disgiunte a causa della distanza o di schermi RF interposti.
- Il malfunzionamento o il guasto di un nodo (accidentale o meno) connesso a sensore non comporta la perdita dei dati misurati fino all'istante del guasto; inoltre è disponibile centralmente l'informazione circa la data e l'ora del guasto. Il malfunzionamento o il guasto di nodi "ripetitori" non comporta la perdita di alcun dato finché esistono percorsi di comunicazione alternativi.

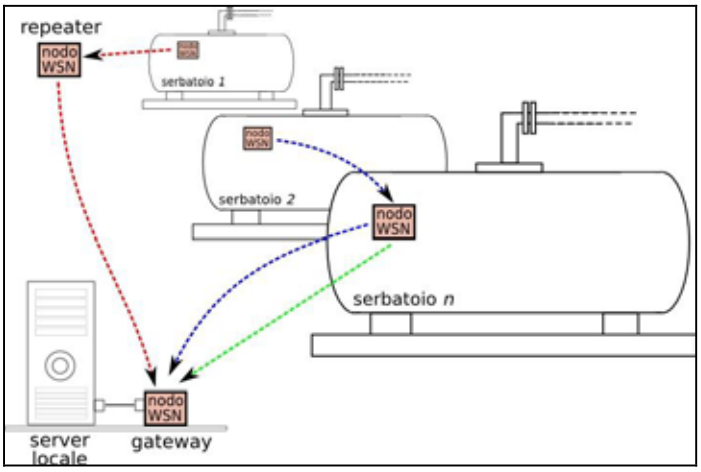


Figura 5: Percorso dei dati dai nodi sensori al gateway

I principali svantaggi di questa soluzione sono:

- L'affidabilità della rete di comunicazione potrebbe essere sensibilmente ridotta in ambienti industriali particolarmente disturbati dal punto di vista delle radio frequenze utilizzate, sia di origine involontaria (motori e forni elettrici, trasformatori, ecc.) che malintenzionata.
- Il livello di security della comunicazione wireless è commisurato alla potenza di calcolo del microcontrollore interno al nodo (normalmente limitata [6]).
- I dati memorizzati nel database centrale sono molto ingenti ed il relativo significato (corrispondenza tra dato numerico e significato fisico) dipende dal particolare sensore monitorato: si tratta tuttavia di un problema minore date le risorse di calcolo attualmente disponibili anche su un mini server.
- La mancanza di sincronizzazione tra orologio locale del singolo nodo e orologio centrale comporterebbe una dislocazione errata degli eventi nel tempo; tuttavia il computo relativo alla vita residua dell'apparecchiatura non è influenzato da scostamenti inferiori al periodo di campionamento.

PARAMETRI DI SCELTA	SOLUZIONE RFID-BASED	SOLUZIONE WSN-BASED
Tipologia dei risultati ottenibili	Il tempo trascorso in ogni intervallo di misura	Dati specifici inerenti i parametri monitorati
Rapidità di accesso ai dati in caso di installazioni multiple	Ogni dispositivo va interrogato individualmente	Tutti i dati sono disponibili nel database centrale
Livello di sicurezza accesso ai dati	Commisurato alle risorse di calcolo del microcontrollore	Commisurato alle risorse di calcolo del microprocessore
Livello di sicurezza trasferimento dati	I dati sono memorizzati localmente	Dipende fortemente dalle risorse di calcolo del microcontrollore
Robustezza in ambienti RF ostili	Molto alto	Basso
Difficoltà setup sistema	Dipende da sensori pre-esistenti e soglie desiderate	Dipende da sensori pre-esistenti
Affidabilità nella registrazione delle informazioni	Media perché le misure effettuate fino al momento del guasto non vengono perse ma l'evento non è rilevabile centralmente	Alta perché le misure effettuate fino al momento del guasto non vengono perse e l'evento è rilevabile centralmente
Operatività dispositivo	~ 3 anni	~ 1 anno
Costo sistema	~20 € per dispositivo. Va aggiunto il costo del sistema di lettura	~40 € per dispositivo e ripetitore. Va aggiunto il costo del server locale

Tabella 1 – Confronto tra le alternative tecnologiche analizzate

9. BIBLIOGRAFIA

[1] Picciolo G., Tonti A., Valutazione di un livello integrato di sicurezza di un sistema di attrezzature per il monitoraggio di temperatura in un'unità di raffineria, SAFAP2008, Cagliari, 12-13 giugno 2008.

[2] Goodrum P., McLaren M. A., Adam Durfe, The application of active radio frequency identification technology for tool tracking on construction job sites, Automation in Construction, 2006, Vol. 15, pp. 292 – 302.

[3] R.Want, Enabling Ubiquitous Sensing with RFID. Computer, Vol. 37 No. 4, April 2004, pp. 84-86.

[4] Chen T., Real-time turbine maintenance system, Expert Systems with Applications, 2009, Vol. 36, pp. 8676–8681.

[5] L. Wang, Enhancing construction quality inspection and management using RFID technology, Automation in Construction, 2008, vol. 17, pp. 467–479.

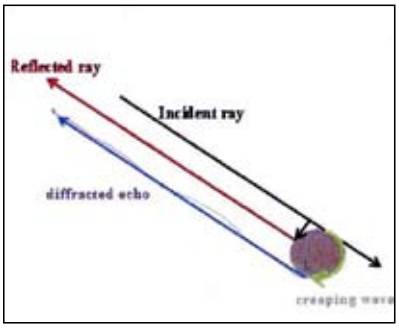
[6] A. Perrig, J. Stankovic, and D. Wagner, Security in Wireless Sensor Networks, Communications of the ACM, vol. 47, no. 6, pp. 53–57, June 2004.

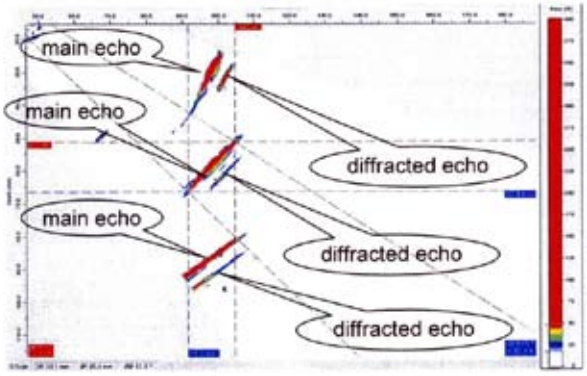
sessione TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

Experimental test on diffracted echo for sizing the hight of defects with Pulse Echo – Phased Array – Tofd Tecniques

*G. Nardoni * - M. Certo * - M. Feroldi * - P. Nardoni * - D. Nardoni **

**I&T Nardoni Institute - BRESCIA ITALY*





Esempio della dinamica dell'eco difratto in corrispondenza di riflettori cilindrici

INTRODUZIONE :

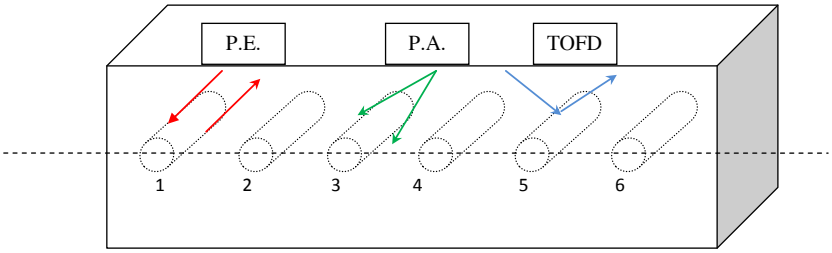
L'ASME ha introdotto nei propri codici un nuovo criterio di valutazione dei difetti,basato sul rapporto fra l'altezza del difetto e lo spessore della saldatura (a/t). L'altezza del difetto non deve più essere espressa in termini di ampiezza dell'eco rispetto alla DAC ma espresso in misura lineare. Ciò ha comportato l'impostazione di un programma di ricerca atto a migliorare il valore stimato di questo importante parametro per definire l'accettazione dei difetti nelle saldature. La relazione riporta l'esperienza di ricerca durata oltre 4 anni condotta su difetti planari e volumetrici in saldature localizzati su spessori compresi tra 50 e 300 mm. L'altezza dei vari difetti nel senso dello spessore (through thickness size) è stato il parametro sul quale è stata condotta la ricerca,finalizzata a valutare la differenza fra il valore reale e il valore misurato. I risultati riportati nella ricerca sono estremamente promettenti e suggeriscono impiego della diffrazione quale elemento aggiuntivo nelle tecniche attuali per il dimensionamento dei difetti.

EXPERIMENTAL DATA

The experimental test ,to evaluate the diffraction phenomena ,when ultrasonic wave hit cylindrical hole with different diameter has been carried out on the test block with side drilled holes with the following diameters :

Hole n°1 : D = 2 mm
Hole n°2 : D = 3 mm
Hole n°3 : D = 4 mm
Hole n°4 : D = 6 mm
Hole n°5 : D = 8 mm
Hole n°6 : D = 10 mm

The depth of the holes was to 50 mm from the scanning surface.



Esempio della dinamica dell'eco difratto in corrispondenza di riflettori cilindrici

Three different UT techniques have been used :

Pulse Eco –Single Cristal

Pulse Eco –Array Cristal (Phased Array)

TOFD –Time of flight diffraction

The results of the diffracted eco for each single technique and single hole are reported in the following figures .From figure 1 to 6 we are discussing about Pulse Eco technique; from pictures 7 t o12 the technique used is the array and from figure 13 to 18 we are used TOFD technique.

1. Pulse echo technique

The Data shown in this section are collected using a standard miniature 60° probe operating at 4 MHz. Figures 1 to 6 display the A-scan obtained for each SDH. Each A-scan shows the main reflected echo immediately followed by the small diffracted echo; on the figure right the distance between the two echoes is reported together with the estimated diameter.

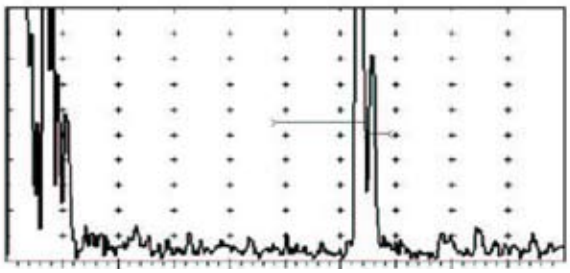


Figure 1: A-scan from a 2 mm SDH Diffracted echo80%.

The distance between reflected and diffracted echo is 3.8 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 3.4 / 1.42 = 2.39 mm

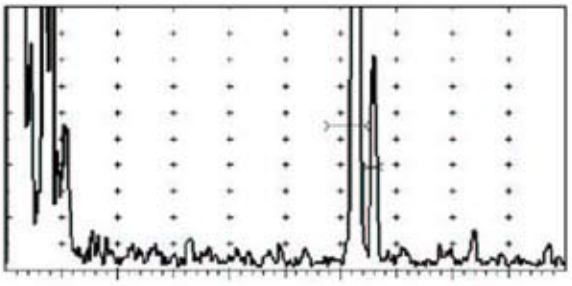


Figure 2: A-scan from a 3 mm SDH. Diffracted echo80%.

The distance between reflected and diffracted echo is 4.7 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 4.7 / 1.42 =3.31 mm

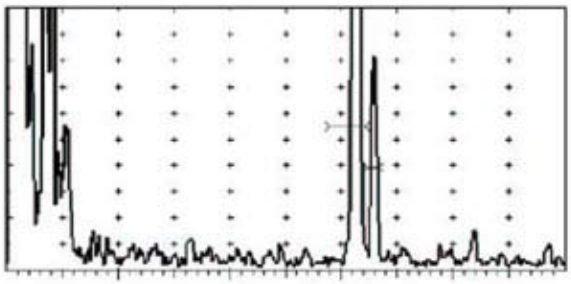


Figure 3: A-scan from a 4 mm SDH. Diffracted echo80%.

The distance between reflected and diffracted echo is 5.6 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 5.6 / 1.42 = 3.94 mm

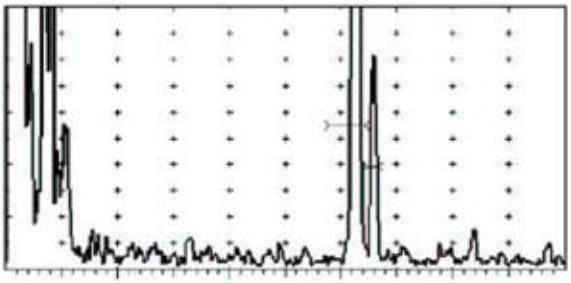


Figure 4: A-scan from a 6 mm SDH. Diffracted echo80%.

The distance between reflected and diffracted echo is 8.8 mm, which correspond to an estimated diameter D :

D = 8.8 / 1. 42 = 6.20 mm

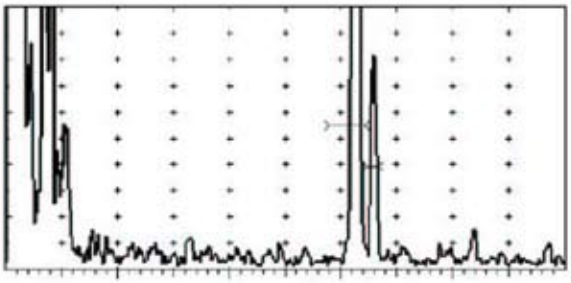


Figure 5: A-scan from a 8 mm SDH. Diffracted echo 80%

The distance between reflected and diffracted echo is 11.6 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 11.9 / 1.42 = 8.38 mm

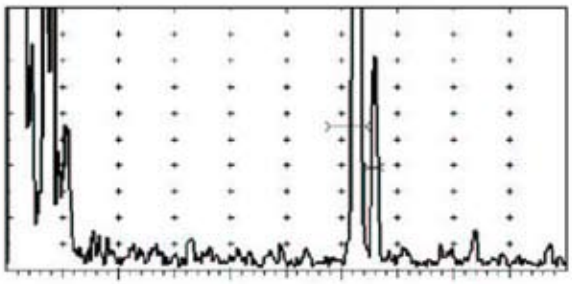


Figure 6: A-scan from a 10 mm SDH. Diffracted echo80%.

The distance between reflected and diffracted echo is 14.1 mm, which correspond to an estimated diameter

D = 14.4 / 1.42 =10.14 mm

2. Phased Array technique

Data shown in this section are collected using a 32 element probe operating at 2.25 MHz. Figures 13 to 18 display the sectorial-scan (S-scan) obtained for each SDH. Each S-scan shows the main reflected echo immediately followed by the small diffracted echo; on the figure right the distance between the two echoes is reported together with the estimated diameter.

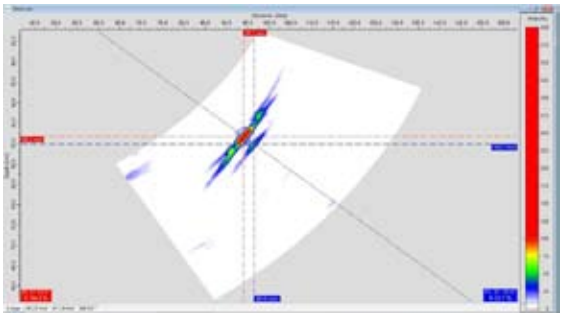


Figure 7: A-scan from a 2 mm SDH.

The distance between reflected and diffracted echo is 3.14 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 3.14 / 1.42 = 2.21 mm

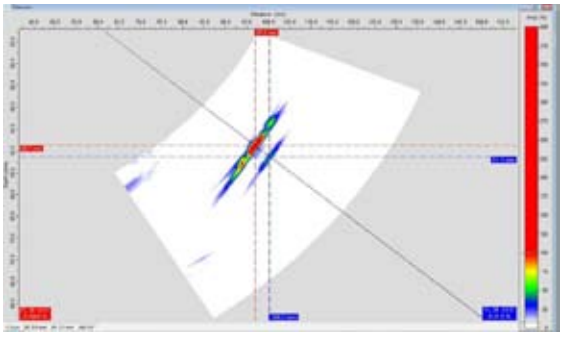


Figure 8: A-scan from a 3 mm SDH.

The distance between reflected and diffracted echo is 4.22 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 4.22 / 1.42 = 2.97 mm

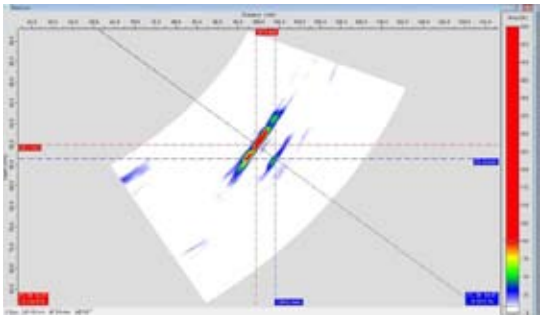


Figure 9: A-scan from a 4 mm SDH.

The distance between reflected and diffracted echo is 5.72 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 5.72 / 1.42 = 4.03 mm

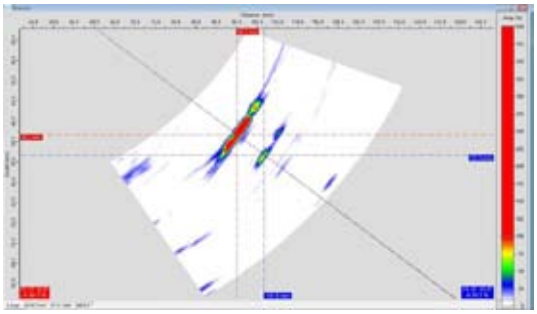


Figure 10: A-scan from a 6 mm SDH.

The distance between reflected and diffracted echo is 8.42 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 8.30 / 1.42 = 5.84 mm

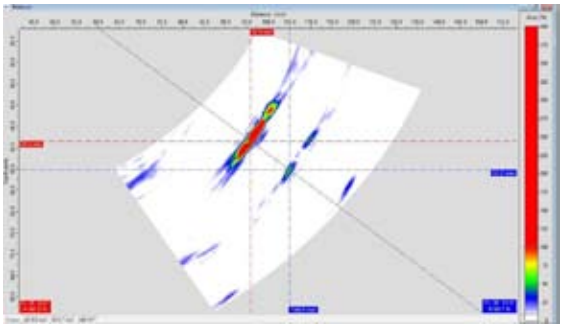


Figure 11: A-scan from a 8 mm SDH.

The distance between reflected and diffracted echo is 11.30 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 11.10 / 1.42 = 7.81 mm

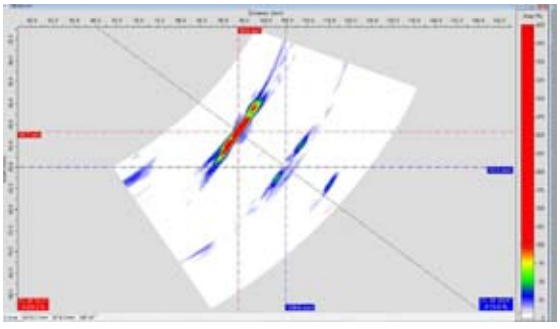


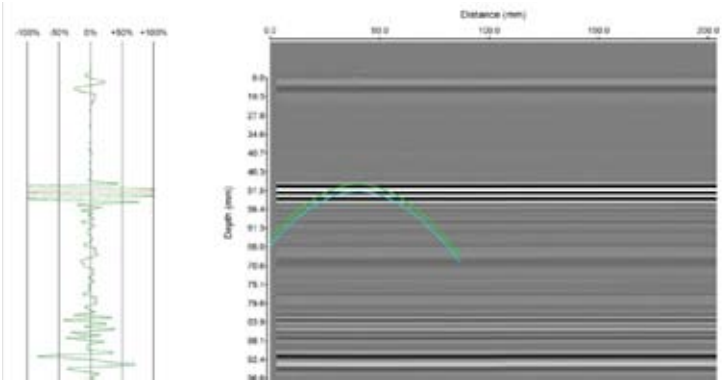
Figure 12: A-scan from a 10 mm SDH.

The distance between reflected and diffracted echo is 13.94 mm, which correspond to an estimated diameter D:

D = 13.94/ 1.42 = 9.82 mm

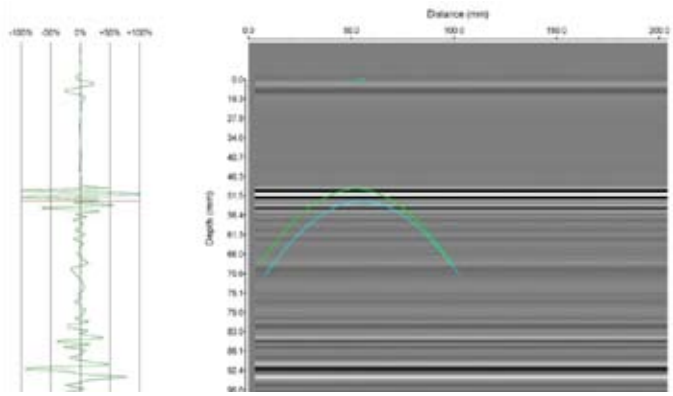
3. TOFD technique

Data shown in this section are collected using a standard miniature 45° probe operating at 2.25 MHz. Figures 19 to 23 display the D-scan obtained for each SDH. Each image shows the main reflected echo immediately followed by the small diffracted echo; on the figure right the distance between the two echoes is reported together with the estimated diameter.



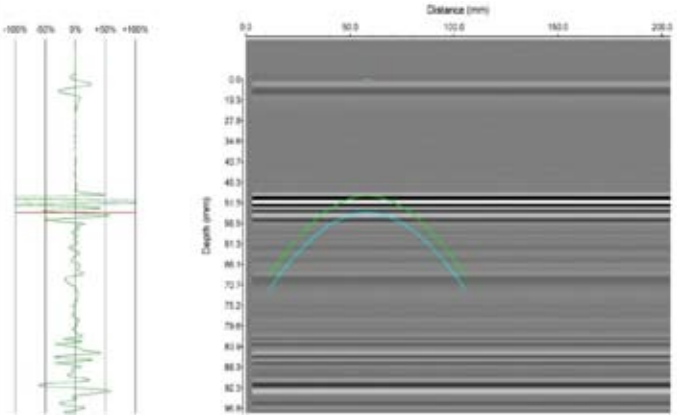
Estimated diameter D:
D = 1.95 mm

Figure 13: A-scan from a 2 mm SDH.



Estimated diameter D:
D = 3.05 mm

Figure 14: A-scan from a 3 mm SDH



Estimated diameter D:
D = 4.08 mm

Figure 15: A-scan from a 4 mm SDH.

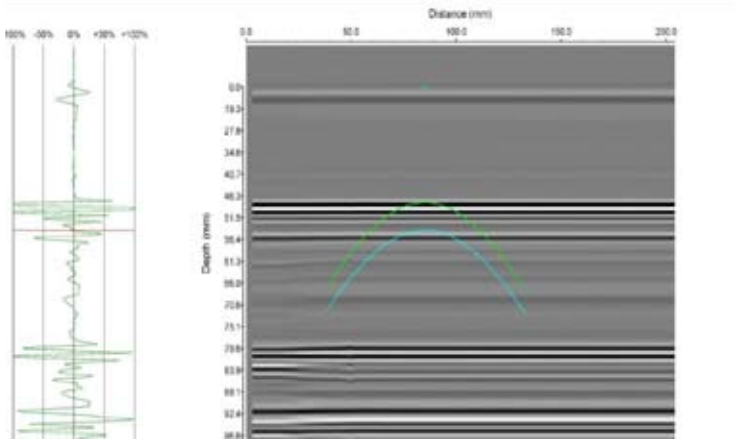


Figure 16: A-scan from a 6 mm SDH.

Estimated diameter D:
D = 6.12 mm

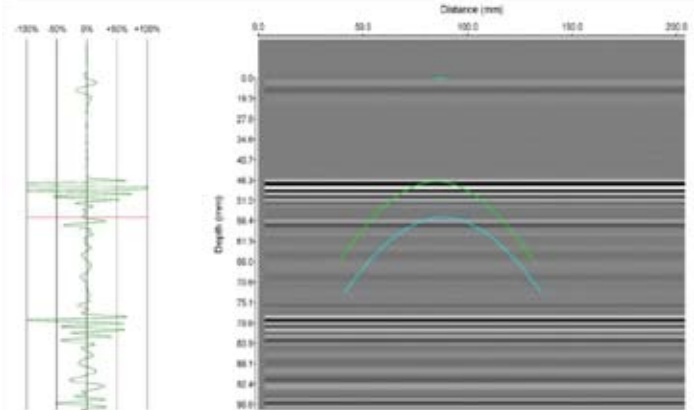


Figure 17: A-scan from a 8 mm SDH

Estimated diameter D:
D = 8.11 mm

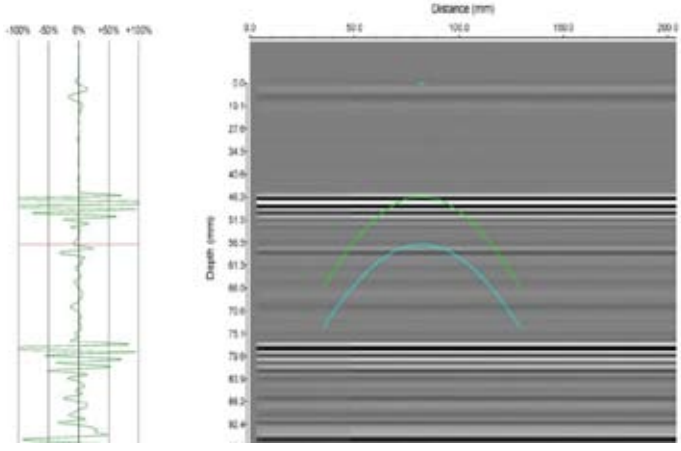


Figure 18: A-scan from a 10 mm SDH.

Estimated diameter D:
D = 10.14 mm

4. Experimental data comparison

In the following table, the estimated data obtained for all the SDH with the three techniques are reported together with a statistical analysis that shows for all the three techniques a good performance in sizing the defects, using diffracted echoes, with errors in the order of a fraction of millimeter.

Side drilled holes		Digital pulse echo		Phased array		TOFD	
ID	diameter	estimated	error	estimated	error	estimated	error
1	2,00	2,39	0,39	2,21	0,21	1,90	-0,05
2	3,00	3,31	0,31	2,97	-0,03	3,10	0,05
3	4,00	3,94	-0,06	4,03	0,03	4,10	0,08
4	6,00	6,20	0,20	5,84	-0,16	6,20	0,12
5	8,00	8,17	0,17	7,81	-0,19	8,20	0,11
6	10,00	9,93	-0,07	9,82	-0,18	10,25	0,14
Average error			0,2		0,133		0,09

Table I: summary of experimental results in sizing side drilled holes with the three ultrasonic techniques Pulse echo –Phased Array – TOFD

5.Final comments

The experimental test have demonstrated that diffracted eco for SDH are always present on the display .

The size accuracy making reference to the diffracted echoes is very high compared to the standard drop technique of 6-20 dB. These results obtained on artificial defects have to be implemented on real defects to demonstrate that this procedure of using the diffracted echo can be transferred also in the practical application. For TOFD this is already a true condition.

Experimental test on diffracted echo on planar reflectors are in progress.

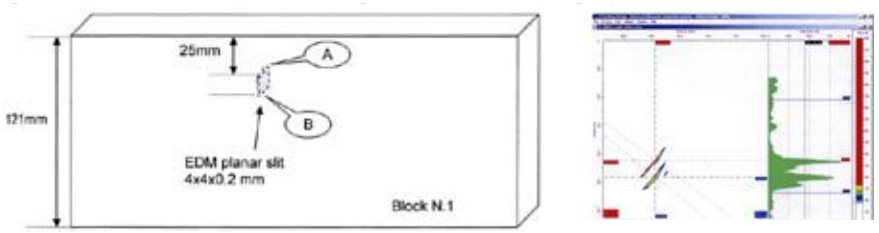


Figure 19. Diffracted eco from planar defects with P.A.

sessione TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

Analisi EA di grandi serbatoi interrati per GPL

G. Augugliaro* - C. De Petris* - C. Mennuti* - P. Quaresima* P. Lenzuni**

**ISPESL – Laboratorio Controlli Non Distruttivi, Dipartimento Tecnologie di Sicurezza*
***ISPESL – Dipartimento Territoriale di Firenze*

1. SOMMARIO

La consolidata esperienza maturata dall'ISPESL riguardo la verifica di riqualificazione decennale per i piccoli serbatoi GPL interrati con tecnica basata sul metodo di Emissione Acustica ha determinato una incentivazione allo studio di una possibile estensione dell'approccio diagnostico su serbatoi di capacità superiore a 13 m3, anche in virtù di emergenti ragioni di domanda del mercato. Naturalmente la diversa tipologia costruttiva, legata essenzialmente alle caratteristiche geometriche della membratura, ai suoi spessori ed alle modalità di installazione hanno imposto per questi serbatoi un approccio applicativo ed operativo della tecnica, ma soprattutto interpretativo dei dati acquisiti, radicalmente differente da quello già sperimentato per i piccoli serbatoi.

L'attività di ricerca è finalizzata alla messa a punto di una procedura conforme ai requisiti della norma UNI EN 12819.

Il lavoro evidenzia alcuni tra gli aspetti più significativi delle fasi della ricerca svolta, le problematiche emerse e, soprattutto, la logica dei procedimenti adottabili per l'analisi dei dati EA e di valutazione dell'attività acustica.

2. INTRODUZIONE

La riqualificazione di piccoli serbatoi interrati mediante tecnica basata sul metodo ad Emissione Acustica (EA) si è avviata in Italia grazie ad un progetto di ricerca ISPESL sviluppatosi nei primi anni del decennio [1]. A cinque anni dall'applicazione estensiva dell'Allegato 1 al D.D. 17 gennaio 2005 [2] è possibile affermare che questa metodica si è affermata, di fatto, come lo standard nel settore. La "Procedura per il controllo di serbatoi interrati per GPL con tecnica basata sul metodo di Emissione Acustica ai fini della verifica decennale" (in breve Procedura EA), attualmente emanata nella sua terza versione [3], ha a sua volta raggiunto una riconosciuta stabilità e affidabilità grazie soprattutto al *feedback* di cui ha fruito per effetto delle risultanze di decine di migliaia di prove EA ad oggi pervenute al Centro Banca Dati EA dell'ISPESL. La procedura EA, inizialmente sviluppata per recipienti fino a 3 m^3, è stata successivamente emendata per poter gestire serbatoi fino a 13 m^3. È chiaro tuttavia che la metodologia sperimentale alla base della prova EA, prevedendo l'uso di due soli sensori risonanti a 150 kHz posti all'interno del pozzetto e replicati per ciascuna virola nel caso di serbatoi con capacità superiore a 5 m^3, è del tutto inadeguata alla verifica di attrezzature di grandi dimensioni.

Questo lavoro presenta un approccio che, sebbene ancora in fase di sviluppo, può rappresentare l'ossatura di una procedura EA per grandi serbatoi interrati con capacità oltre 13 m^3, conforme ai requisiti della norma UNI EN 12819 [4]. L'attività sperimentale di seguito illustrata è frutto di una serie di esperienze condotte su una decina di serbatoi di capacità compresa tra

15 e 25 m^3, con diametro di poco inferiore a 2 m e spessori compresi tra 7 e 10 mm. Per altro, tali serbatoi campione già riesumati dopo un lungo periodo di esercizio, sono stati selezionati sulla base di evidenti e severi attacchi corrosivi per meglio evidenziare l'efficacia dell'approccio diagnostico.

3. PRINCIPALI ASPETTI DELLE PROVE EA SU GRANDI SERBATOI

Nel passaggio da recipienti di qualche m^3 a recipienti di molte decine o centinaia di m^3, occorre che diversi aspetti della procedura di prova siano ripensati. In particolare, le dimensioni del sistema oggetto dell'indagine implicano importanti modifiche su almeno tre aspetti:

1) non ha senso operare con coppie di sensori dedicati a ciascuna virola. Tuttavia, il numero dei sensori utilizzabili è comunque ridotto dall'accessibilità alla membratura che, essendo il serbatoio interrato o tumulato, rimane giocoforza molto limitata. Inoltre la limitata accessibilità implica anche una configurazione dei sensori fortemente disomogenea, che copre bene alcune aree e per niente altre. In pratica ci si è orientati verso una configurazione con sensori disposti in doppia fila, simmetricamente rispetto alla linea generatrice del mantello posta alla quota più alta. La Fig. 1 illustra un allestimento di prova per un serbatoio da 15 m^3, con una configurazione ad *array* di sei sensori (3 sensori per 2 file);
2) l'acquisizione dei segnali EA deve necessariamente essere integrata da un metodo di estrapolazione che "ricostruisca" l'attività EA specialmente nelle zone del serbatoio più distanti dai punti di posizionamento dei sensori. L'attenuazione delle onde a frequenze intorno a 150 kHz è infatti sufficientemente elevata da creare un significativo calo dell'efficienza di rilevazione dell'onda elastica a distanze di qualche metro [5]. Per tale ragione è in sviluppo l'applicazione di sensori con diverse caratteristiche di sensibilità e risposta in frequenza centrata intorno a 75 kHz, che per gli spessori in gioco, ai modi d'onda ed alle relative curve di dispersione, comportano un'attenuazione è significativamente inferiore;



Fig. 1 – Allestimento di prova di un serbatoio da 15 m^3 con 2 file di 3 sensori, disposti a ore 11.05

3) la valutazione dell'idoneità strutturale basata sull'interpretazione dei dati EA deve necessariamente passare per una mappatura dell'attività acustica sul serbatoio, relativa sia alla densità numerica che alla densità di energia degli eventi, in modo da identificare i *cluster* con maggiore potenziale di criticità. Ciò automaticamente implica un'accurata localizzazione degli eventi stessi.

4. IL METODO – A) OTTIMIZZAZIONE DELLA LOCALIZZAZIONE SU UNA CONFIGURAZIONE A SEI SENSORI

La localizzazione di un evento sulla membratura del serbatoio produce un risultato (la posizione della sorgente) che dipende sia dal numero dei sensori utilizzati nel processo, sia dalla configurazione strumentale imposta per la discriminazione di un evento.

La disponibilità di alcuni serbatoi fuori terra sui quali è stato possibile posizionare un reticolo omogeneo di sensori, ha consentito una "calibrazione" preliminare del sistema di localizzazione, che ha condotto alla ottimizzazione sia del numero dei sensori utili, sia della configurazione strumentale dei parametri di discriminazione dell'evento. In dettaglio, l'ottimizzazione è stata raggiunta minimizzando lo scarto fra il numero di eventi localizzati, in specifiche aree del serbatoio, dal reticolo omogeneo dei sensori, e da quello disomogeneo utilizzato effettivamente nei *test*. Per serbatoi di capacità intorno a 15 m^3, l'ottimizzazione ha prodotto come risultato N = 4 sensori utili, mentre per i parametri temporali, ovvero la distanza temporale fra l'ultimo *hit* di un evento e il primo *hit* del successivo, la massima distanza temporale fra il primo e l'ultimo *hit* di un evento, e la massima distanza temporale fra due *hit* successivi di uno stesso evento (indicati rispettivamente come FHCDT, DTX1 e DTXN dal sistema di acquisizione Vallen Systeme AMSY 5 utilizzato in questo studio), si sono ottenuti valori pari a 1 ms, 0,5 ms e 0,5 ms rispettivamente.

5. IL METODO – B) DEFINIZIONE DI UN RETICOLO VIRTUALE

Per poter raggiungere l'obiettivo della mappatura del numero e dell'energia degli eventi è stata definita, per semplicità e limitatamente alla parte cilindrica del serbatoio (mantello), un reticolo virtuale a maglia quadrata di lato L, immaginando il posizionamento di un sensore virtuale, di caratteristiche identiche a quelle dei sensori realmente installati, in corrispondenza di ciascuno dei nodi del reticolo stesso. La rappresentazione del reticolo è quella riportata in Fig. 2. A ciascuna maglia sono stati inizialmente assegnati tutti quegli eventi localizzati (LE) la cui sorgente possiede coordinate comprese all'interno della maglia stessa. La dimensione del lato L della singola maglia è stata fissata in 50 cm. al fine di disporre di una risoluzione spaziale discreta (considerate le dimensioni del serbatoio di qualche metro), e al tempo stesso non lasciare troppe maglie con zero LE iniziali, sulle quali il metodo di ricostruzione che illustreremo opera con efficienza ridotta (vedi sezione 9).

L_M lunghezza del mantello
D diametro del mantello e massimo dei fondi

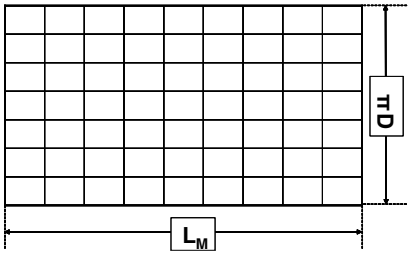


Fig. 2 – Rappresentazione schematica del reticolo virtuale realizzato sul mantello e sul fondo del serbatoio

6. IL METODO – C) DEFINIZIONE DELLA DISTRIBUZIONE CUMULATIVA DEL NUMERO DI EVENTI LOCALIZZATI

A causa della distribuzione disomogenea dei sensori sul serbatoio, l'efficienza con cui vengono individuati gli LE sul serbatoio è funzione decrescente della distanza sorgente – sensore. Per determinare il numero e la consistenza degli eventi più lontani e/o deboli, sarebbe essenziale conoscere la "vera" distribuzione di probabilità all'origine, ovvero quella con cui vengono generati eventi localizzati $N_{LE}(A)$.

Due considerazioni preliminari:

a. poiché un LE è tale quando il segnale viene rilevato sopra la soglia da almeno tre sensori, la distribuzione cumulativa deve avere come oggetto le ampiezze dei "terzi *hits*" degli LE. Va chiarito che in questo contesto "terzo" non si riferisce, come canonicamente assunto,

ad una sequenza temporale, ma ad un ordine gerarchico delle ampiezze (A) rilevate per lo stesso evento, ordinate in senso decrescente (dalla massima alla minima). In altre parole, se la terza maggior ampiezza della sequenza è comunque oltre soglia, si distingue un evento localizzato (LE), altrimenti un non-evento (ovvero una semplice sequenza di 1 o 2 *hit*).

b. il processo di "ricostruzione" va ad intervenire sugli eventi allocati a ciascuna singola maglia del reticolo. Ciò significa che esso viene applicato ad LE che sono in generale ben più vicini fra di loro di quanto non lo siano ad un sensore reale, e che pertanto si trovano in condizioni di attenuazione molto prossime fra di loro.

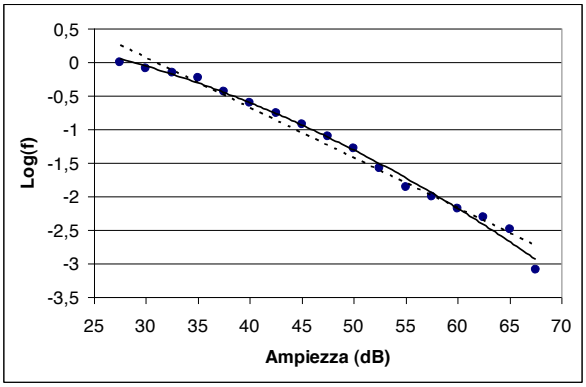


Fig.3 – Distribuzione cumulativa normalizzata delle ampiezze dei terzi hit, con fit lineare (linea tratteggiata) e fit polinomiale di secondo grado (linea continua).

Ciò premesso, la distribuzione degli eventi all'origine è stata approssimata mediante la cumulativa $f_{LE}(A_3)$, che descrive la frazione degli LE rilevati con ampiezze dei terzi *hit* maggiori in A. Tale cumulativa è stata ottenuta sommando tutti gli LE che il sistema localizza nelle maglie prossime alla posizione dei sensori installati e, più nello specifico, a quelle che hanno almeno uno dei loro quattro nodi distante non oltre 70 cm da uno dei sensori. La funzione $f_{LE}(A)$ è mostrata nella Fig. 3, ed ha un significato che per semplicità potremmo assimilare a quello di un *iceberg* bidimensionale capovolto. Definiamo per ogni maglia una ampiezza virtuale minima $(A_V)_{min}$, che verrà illustrata nel dettaglio nella sezione successiva. Quegli eventi per cui il terzo *hit* possiede un ampiezza maggiore o uguale ad $(A_V)_{min}$ (la parte più a destra della figura) vengono effettivamente rilevati, e rappresentano la "punta dell'iceberg"; gli eventi con terzi *hit* di ampiezza minore di $(A_V)_{min}$ formano la parte subacquea dell'*iceberg* (la parte più a sinistra della figura) che l'*array* dei sensori installati non riesce a rilevare. La cumulativa della Fig. 3 non è ben approssimata da una retta (linea tratteggiata), quanto invece ben interpretata da un polinomio di secondo grado (linea continua). È pertanto possibile ammettere un *fit* analitico di questo tipo senza introdurre particolari imprecisioni.

7. IL METODO – D) CALCOLO DELL'ATTENUAZIONE DIFFERENZIALE DI UN LE

Poiché la cumulativa è stata costruita con gli LE più vicini ai sensori installati, essa non è affetta da fenomeni di attenuazione per dimensioni maggiori di quelle della maglia virtuale. Pertanto l'ampiezza virtuale minima $(A_V)_{min}$, ovvero l'ampiezza minima all'origine degli LE effettivamente rilevati, è stata posta pari alla soglia fissata nell'acquisizione più una quantità, che chiameremo attenuazione differenziale media. Si tratta del valore, mediato sugli LE di una maglia, dell'attenuazione differenziale $\Delta H(d_{12}) = H(d_1) - H(d_2)$ che risulta data dalla differenza fra due attenuazioni:

1) l'attenuazione $H(d_1)$ associata alla distanza d1 dalla sorgente del LE al sensore reale "efficace"; il sensore reale "efficace" è il terzo sensore reale più vicino all'evento stesso.

2) l'attenuazione $H(d_2)$ associata alla distanza d_2 dalla sorgente del LE al sensore virtuale "efficace"; il sensore virtuale "efficace" è il terzo sensore virtuale più vicino all'evento stesso.

L'attenuazione differenziale quantifica pertanto l'aumento di sensibilità che si ottiene passando dal reticolo di sensori reali al reticolo di sensori virtuali. La media aritmetica dei valori di $\Delta H(d_{12})$ ottenuti per tutti gli LE di una maglia, fornisce l'attenuazione differenziale media per quella specifica maglia.

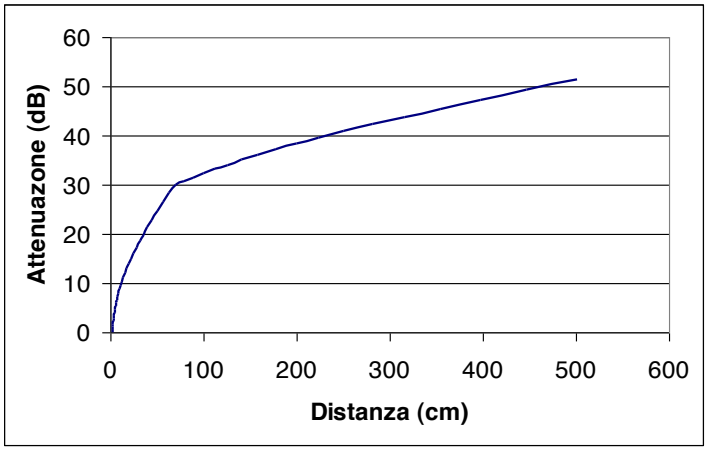


Fig. 4 - attenuazione in funzione della distanza, relativa a 2 cm

L'attenuazione è un elemento critico dell'approccio descritto in questo lavoro. Essa è stata approssimata mediante due contributi, uno fisico e uno geometrico. Mediante *fit* su dati sperimentali relativi a serie di *hit* riconducibili allo stesso evento, acquisiti con ampiezze diverse da sensori a distanze diverse dalla sorgente, sono stati determinati i coefficienti numerici sia per la parte fisica, sia per la parte geometrica, ottenendo, per l'attenuazione fisica

in campo vicino e $$A_{NF} = 22\ dB/m \qquad (1a)$$

in campo lontano $$A_{FF} = 3\ dB/m \qquad (1b)$$

La distanza critica che separa il campo vicino da quello lontano è stata determinata in 67 cm. Per l'attenuazione geometrica si è invece ottenuta la relazione:

$$A_G = 10 \times \log(d) \qquad (1c)$$

L'attenuazione complessiva, posta convenzionalmente pari a zero per d = 2 cm, è mostrata nella Fig. 4.

8. IL METODO – E) CALCOLO DELLA DENSITÀ NUMERICA DEGLI LE

Sulla base del procedimento fin qui illustrato, si sono ricavate tutte quelle informazioni propedeutiche al completamento del processo di ricostruzione dell'attività EA. Così, indicato con N0 il numero degli LE effettivamente rilevati e assegnati ad una certa maglia, il numero totale NLE degli LE ad essa attribuibili può essere ricavato utilizzando l'espressione:

dove $$N_{LE} = N_0 \times K_N \qquad (2)$$

$$K_N = 10^{-\log f_{LE}(A_V)_{\min}} \qquad (3)$$

Nella equazione (3) f_{LE} è la distribuzione cumulativa normalizzata definita in precedenza nella sezione 6.

Infine, dalle equazioni (2) e (3) è immediato calcolare la densità numerica degli LE

$$\sigma_N(x,y) = \frac{N_{LE}}{L^2} \qquad (4)$$

dove (x,y) sono le coordinate del centro della maglia e L è il lato della maglia.

9. IL METODO – F) LE MAGLIE CON ZERO EVENTI RIVELATI

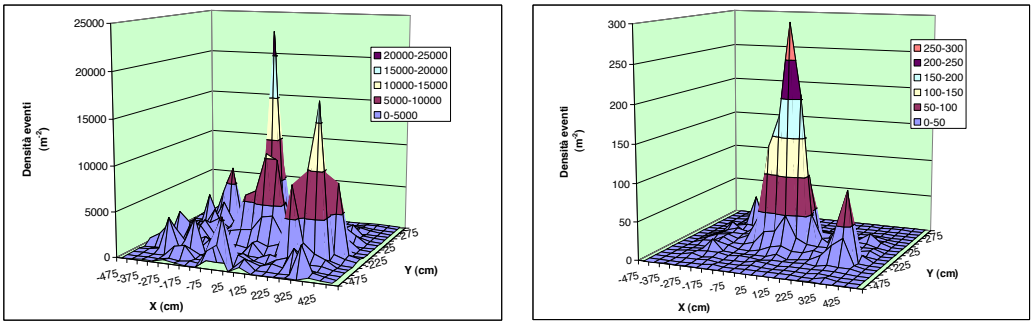
Delle centinaia di maglie che compongono il reticolo virtuale, è risultato che generalmente circa la metà non contiene alcun LE ($N_0 = 0$). Poiché il processo di ricostruzione avviene applicando un fattore moltiplicativo al numero di eventi effettivamente rilevato all'interno di una maglia (equazione 2), è evidente che queste maglie risultano "vuote" anche a valle del processo stesso, determinando brusche discontinuità nella mappa della densità degli eventi.

Per risolvere questo problema, si è adottato un approccio interpolativo, in base al quale a ciascuna maglia è stato assegnato un numero iniziale di eventi pari a

$$N'_0 = 1/(d/L+1) \qquad (5)$$

dove d è la distanza fra il centro della maglia "vuota" e il centro della maglia "non vuota" più vicina.

Riguardo all'attenuazione virtuale minima, essa è stata posta pari a quella della maglia "non vuota" più vicina. Con queste due quantità, applicando la serie di equazioni (2) – (4), si è ottenuta la mappa continua della densità locale degli eventi ricostruiti (Fig. 5a). Per confronto la Fig. 5b mostra la mappa limitata agli eventi rilevati dai sensori effettivi.



a) b)

Fig. 5 – Mappa del numero di eventi a) eventi totali, b) solo gli eventi rilevati.

10.IL METODO – G) CALCOLO DELLA DENSITÀ ENERGETICA DEGLI LE

Per il calcolo della densità locale di energia va operato un processo di ricostruzione concettualmente simile, anche se non identico, a quello illustrato in precedenza per il numero degli eventi. Mentre infatti degli eventi effettivamente rilevati possiamo conoscere l'energia, questa informazione è ovviamente assente per gli eventi non rilevati. Il percorso al riguardo intrapreso viene di seguito illustrato:

1) per gli eventi effettivamente rilevati, e dei quali è pertanto nota l'energia individuale nel sistema dei sensori installati, è stata calcolata l'energia nella griglia virtuale tenendo conto del-

l'attenuazione differenziale media ΔH_{12} definita in precedenza;

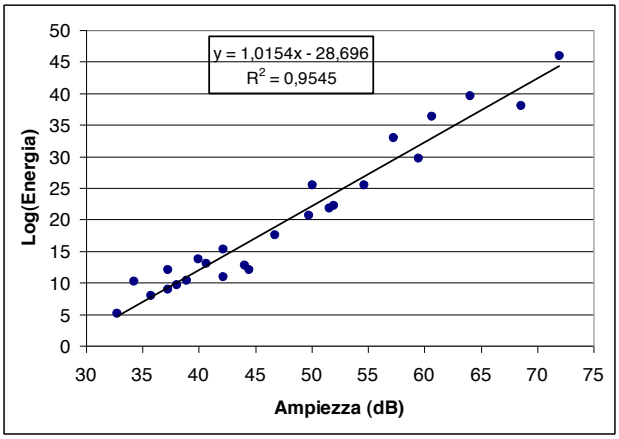


Fig.6 – Relazione fra energia ed ampiezza.

Poiché l'energia è, con ottima approssimazione, direttamente proporzionale all'ampiezza (in Volt) dell'hit, ovvero $\log(E) = A_{dB}$ + costante (vedi Fig. 6), l'attenuazione differenziale media ΔH_{12} si traduce in un fattore

$$K_E = 10^{0,1 \times \Delta H_{12}} \qquad (6)$$

Ad ognuno degli eventi rilevati viene pertanto associata un'energia $E \times K_E$. Il totale, per gli LE rilevati, viene ottenuto dalla relazione

$$E_{RIL} = \sum_j E_j \times K_E \qquad (7)$$

2) per gli eventi "recuperati" dal processo di ricostruzione, dei quali non è nota l'energia individuale, si è proceduto a definire la relazione $E(A_3)$ che lega l'ampiezza dei terzi *hit* alle energie degli LE. È stata inoltre determinata, integrando la cumulativa, la distributiva $g_{LE}(A_3)$ del numero degli LE in funzione dell'ampiezza del terzo *hit*, ottenendo per l'energia complessiva

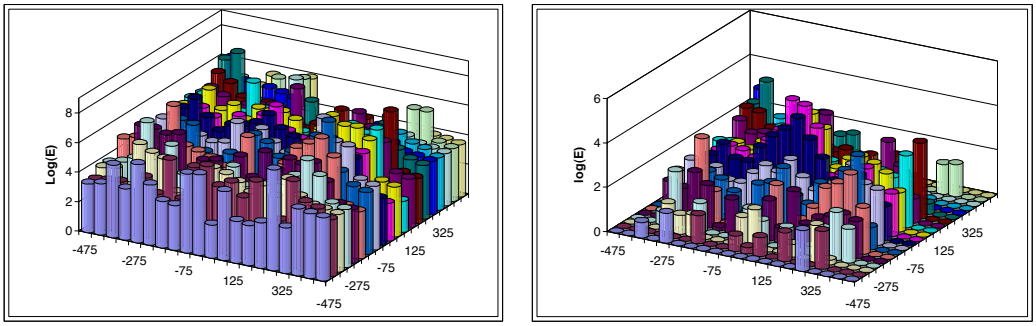
$$E_{RIC} = \frac{N_{LE} \times \int_{Soglia}^{Soglia+\Delta H_{12}} g_3(A) \times E(A) dA}{\int_{Soglia}^{Soglia+\Delta H_{12}} g_3(A) dA} \qquad (8)$$

In pratica l'equazione (8) assegna a ciascuno degli LE recuperati un'energia pari alla media delle energie sulle ampiezze, pesata dalla probabilità con cui un LE di data ampiezza si presenta.

Infine, la densità di energia totale $\sigma_E(x, y)$ viene calcolata come

$$\sigma_E(x, y) = \frac{E_{RIL} + E_{RIC}}{L^2} \qquad (9)$$

La Fig. 7a mostra la mappa della densità di energia ottenuta applicando la procedura descritta. Per confronto la Fig. 7b mostra la mappa della densità di energia così come si risulta dal test, ovvero senza alcun processo di ricostruzione.



a) b)

Fig.7 – Mappe di energia a) a valle del processo di ricostruzione b) a monte del processo

11. CONCLUSIONI

Lo sviluppo di una procedura specifica per il controllo di grandi serbatoi interrati è una sfida nient'affatto agevole. L'analoga procedura messa a punto per i piccoli serbatoi necessita infatti di essere modificata in numerosi punti, sia sul versante delle tecniche sperimentali richieste, decisamente più complesse, sia sul versante della elaborazione dei dati, i quali vanno sottoposti ad un considerevole processo interpretativo essenzialmente mirato a ricostruire il numero e l'energia degli eventi "non visti" all'interno di ciascuna zona del serbatoio.

Nel complesso si tratta di un percorso fortemente innovativo, e di grandi potenzialità nel panorama italiano dei controlli non distruttivi sui serbatoi per GPL. Va da sé che l'incertezza associata alle mappe finali di densità del numero di eventi e dell'energia non potrà essere piccola, e sarà quindi essenziale che il sistema sia tarato con margini di sicurezza opportuni.

È comunque evidente che, a meno di un (improponibile) sterramento, tecniche alternative non possono in alcun modo vantare precisioni superiori.

L'approccio illustrato in questo lavoro necessita nell'immediato futuro di un consistente riscontro sperimentale di validazione e taratura. Rimane comunque forte la convinzione, come peraltro sperimentato per i piccoli serbatoi, di rappresentare un punto di incontro credibile tra la garanzia di un livello di sicurezza certamente ammissibile ed un impatto economico pienamente sostenibile.

12. BIBLIOGRAFIA

[1] C. De Petris, C. Mennuti, V. Mazzocchi, P. Lenzuni, C. Delle Site, "Controllo di serbatoi per GPL interrati con emissioni acustiche" - Convegno "Sicurezza ed affidabilità delle attrezzature a pressione", Roma 10 – 11 Giugno 2004, pp. 134 – 146

[2] Decreto 17 gennaio 2005, "Procedura operativa per la verifica decennale dei serbatoi interrati per GPL con la tecnica basata sul metodo delle emissioni acustiche", pubblicato sul Supplemento Ordinario n. 15 della Gazzetta Ufficiale n. 30 del 7 febbraio 2005

[3] "Procedura per il controllo di serbatoi interrati per GPL di capacità non superiore a 13 m^3 con tecnica basata sul metodo di Emissione Acustica ai fini della verifica di integrità, Revisione 2 – Dicembre 2008", http://www.ispesl.it/ispesl/dom/documenti/Procedura%20EA%20Rev%202.pdf

[4] UNI EN 12819, "Ispezione e riqualifica dei serbatoi installati fuori terra per gas di petrolio liquefatti (GPL) di capacità geometrica maggiore di 13 m_3"

[5] Rogers L. M., "Structural and Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods – Fundamentals and Application", Lloyd's Register, London, 2001

sessione TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

La valutazione sullo stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica d'integrità, in accordo all'art. 16 del D.M. 329/04: benefici derivanti dall'ispezione con campo remoto (RFT) e correnti indotte (ET)

F. Rossetti *
*R. Invernici***
F. Zullo ***

** ISPESL, Dipartimento di Verona*
***esperto, livello 3 EN-473 metodi UT ET PT VT*
****esperto, progettista e consulente*

ABSTRACT

L'introduzione dell'obbligatorietà delle riqualificazioni periodiche di apparecchi a pressione non certificati secondo PED con l'art. 16 del D.M. 329/04, hanno aperto una nuova area di controlli su impianti in servizio installati sul campo.

Tale area ha una complessità intrinseca dovuta alle difficoltà di operare su impianti in funzionamento con sistemi di controllo che possano ridurre al minimo le interferenze con la produzione e soprattutto possano confrontarsi con particolarità e articolazione delle attrezzature nei luoghi di lavoro.

In particolare le tubazioni, sia per la loro lunghezza che per il loro posizionamento in aree spesso inaccessibili, pongono seri problemi per lo sviluppo di CND idonei a dare valide indicazioni per la loro valutazione sullo stato di conservazione ed efficienza. Il metodo delle correnti indotte e del campo remoto può dare una risposta adeguata per un primo approccio conoscitivo sullo stato di conservazione delle tubazioni, che può essere utilizzato per misurazione di spessori di materiali e di rivestimenti, rilevazione di cricche e danni da corrosione, misurazioni di conduttività per identificazione di materiali, monitoraggio di trattamenti termici, rilevazione di danneggiamenti da surriscaldamento.

Partendo da un inquadramento del metodo di ispezione di tubazioni mediante correnti indotte e campo remoto, in cui vengono schematizzati concetti base e procedure standard di controllo, la memoria presenta un quadro dei risultati ottenuti da misure su tubazioni sia all'interno del processo produttivo, sia in situazioni di esercizio sul campo. Dai commenti delle misure prodotte in memoria si potranno evidenziare i vantaggi, quali la sensibilità del metodo anche a piccoli difetti, il rilievo di anomalie superficiali e sottopelle, la trasportabilità dell'apparecchiatura e la versatilità anche in campo, la possibilità di ispezionare anche per molti metri di sviluppo tubazioni anche articolate.

Al termine della memoria verranno evidenziati anche i limiti dell'ispezione, quali la buona esperienza che l'operatore deve accumulare per l'interpretazione dei risultati, l'uso del metodo solo per materiali conduttivi, le interferenze prodotte dalle finiture superficiali, l'accessibilità ad aree superficiali per applicare gli strumenti di misura

1. PREMESSA: L'ATTIVITÀ APPLICATIVA

Il presente articolo analizza i dati raccolti e l'esperienza ottenuta in campo degli ultimi quattro anni nel controllo con correnti indotte (Eddy Current - ET) e campo remoto (Remote Field - RFT) di tubazioni in materiali ferromagnetici e diamagnetici in uso per più di cinque anni in molteplici realtà produttive.

L'esperienza trattata nell'articolo analizza i dati inerenti all'ispezione di 27.807 tubi e di lunghezza totale pari a 170 Km, aventi diametro da 19,05 a 88,90 mm e spessore di parete da 1,25 a 6,30 mm.

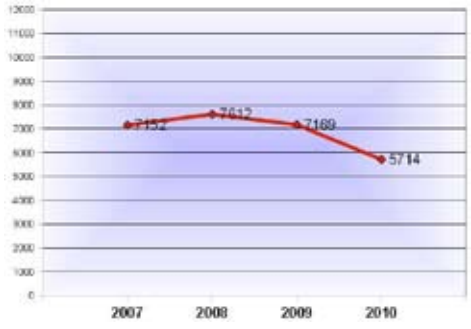


Fig.1 – Andamento tubi ispezionati per Anno

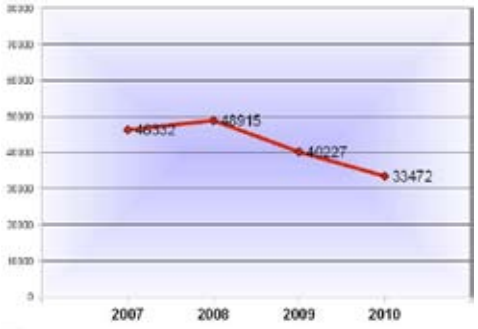


Fig 2 – Andamento metri ispezionati per Anno

2. INTRODUZIONE: ALCUNE NOTE SULLA TECNOLOGIA DEI CND IN OGGETTO

Poiché i controlli ET ed RFT sono tecniche che sfruttano il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, non richiedono il contatto con la parte che viene ispezionata, generando un proprio campo elettromagnetico che può essere percepito attraverso gli effetti della corrente indotta sulla bobina di eccitazione primaria o per mezzo della forza elettromotrice prodotta da una bobina secondaria. Il campo elettromagnetico generato dalla corrente che percorre una bobina primaria, investe il materiale da esaminare generando in esso delle correnti indotte (eddy currents) che circolano in senso opposto. Qualsiasi tipo di difetto che altera il flusso delle correnti indotte modifica anche l'impedenza della bobina della sonda, che quindi rileva anomalie quali usura, riduzione delle pareti, asperità, corrosioni, erosioni, sfaldamenti, cricche. Dal rilievo di eventuali variazioni del valore dell'impedenza della bobina ne discende la localizzazione dell'anomalia nel tubo. Il metodo è quindi molto versatile e consente l'individuazione non solo di disomogeneità di tipo fisico-geometrico, ma anche di tipo elettrico o magnetico, correlata quindi alle caratteristiche chimico-fisiche dell'elemento sotto controllo. La discriminazione delle due tecniche, uguali nel principio fisico e simili nello studio e analisi del campo magnetico generato, è dovuta essenzialmente al tipo di materiale ispezionato: il controllo ET trova infatti ampia applicazione nell'ispezione di tubi non ferromagnetici. Nei materiali ferromagnetici si verificano infatti effetti elettromagnetici addizionali che normalmente sono di ampiezza tale da oscurare il campo delle correnti indotte. Questi effetti magnetici dipendono dalla permeabilità magnetica del materiale, i quali possono essere eliminati temporaneamente magnetizzando il materiale portandolo a saturazione con un campo magnetico in corrente continua. Per tale motivo, il controllo in campo su materiale ferromagnetici, impone l'utilizzo della tecnica a campo remoto (RFT), che permette di non variare la permeabilità magnetica nel materiale ispezionato.

Questa premessa dall'aspetto teorico semplice, è stata necessaria per rendere chiara la discriminazione delle due tecniche di controllo.

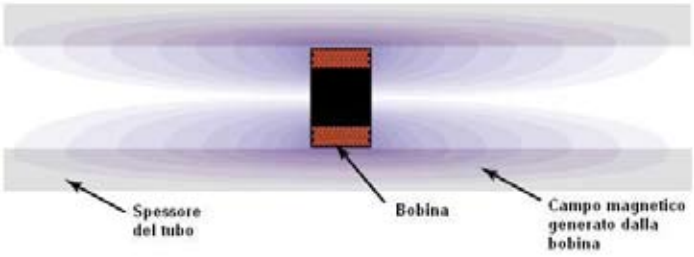


Fig 3 – Effetti del campo magnetico generato in un tubo

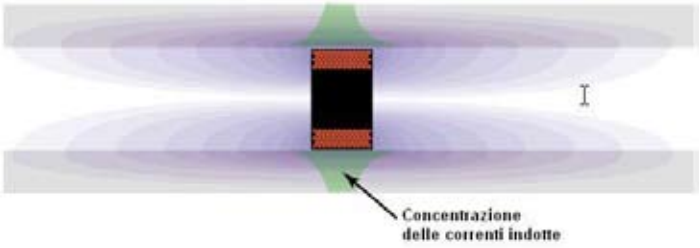


Fig. 4 – Correnti parassite generate in prossimità della bobina primaria

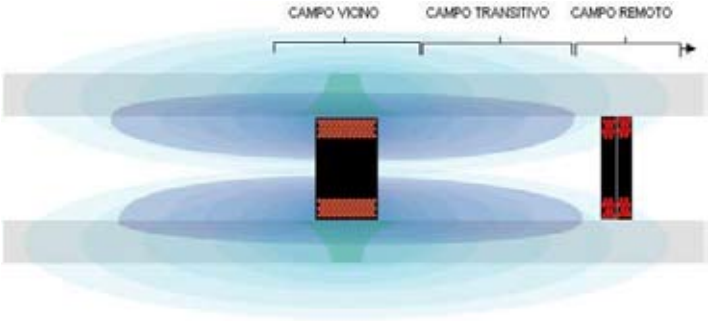


Fig. 5 – Differenza di analisi nel campo magnetico delle tecniche ET e RFT

3. QUADRO DELLA METODOLOGIA D'INTERVENTO E DEI RISULTATI

L'analisi dei dati ottenuti durante l'ispezione dei 27.807 tubi è stata ottenuta utilizzando personale di Livello 2 qualificato nel metodo ET in accordo alla normativa Europea di certificazione del personale addetto alle prove non distruttive secondo UNI EN-473. Il processo di qualificazione del personale addetto ai controlli è di particolare importanza per questo tipo di misure. Pur essendo ampio e dettagliato il programma di formazione e addestramento del personale destinato all'esame di qualificazione in questo tipo di controlli non distruttivi è di cruciale importanza l'acquisizione di un buon bagaglio di esperienza sul campo, che consente di discriminare reali anomalie da falsi allarmi, dovuti a scarsa pulizia delle pareti o altre disfunzioni nello svolgimento delle misure.

3.1 Campioni di calibrazione

A differenza di altri metodi di controllo utilizzati in campo, come gli ultrasuoni od il sistema radiografico, che possono utilizzare curve DAC (fornite dai costruttori delle sonde e apparecchiature) o penetrametri normatizzati, per la calibrazione degli strumenti in uso per le correnti indotte e il campo remoto si devono utilizzare campioni di riferimento delle stesse dimensioni (OD x WT) e acciaio del materiale da ispezionare, riportati nelle normative Europee o internazionali. A titolo esemplificativo, viene riportato in fig.6 il campione utilizzato maggiormente per il controllo dei tubi analizzati nel presente articolo.

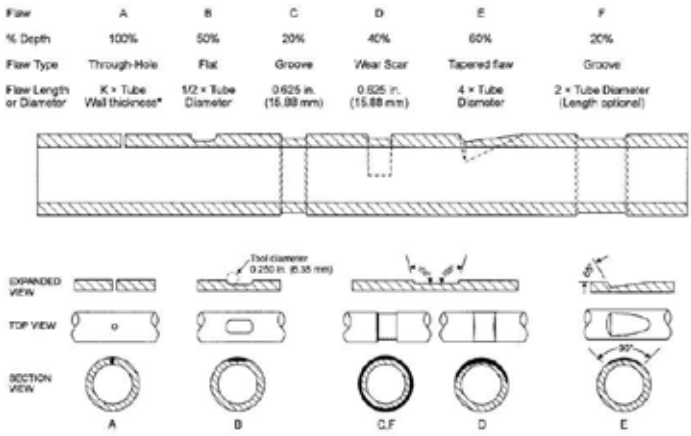


Fig. 6 – Tubo campione in accordo alla normativa ASTM E2096

3.2 Apparecchiature

Nei controlli in campo vengono utilizzate apparecchiature ad alimentazione continua o portatili, con software di gestione e archivio dei segnali ottenuti, utili sia per la rintracciabilità dei tubi analizzati, sia per un confronto nel tempo dello stato del materiale ispezionato (Fig.7).

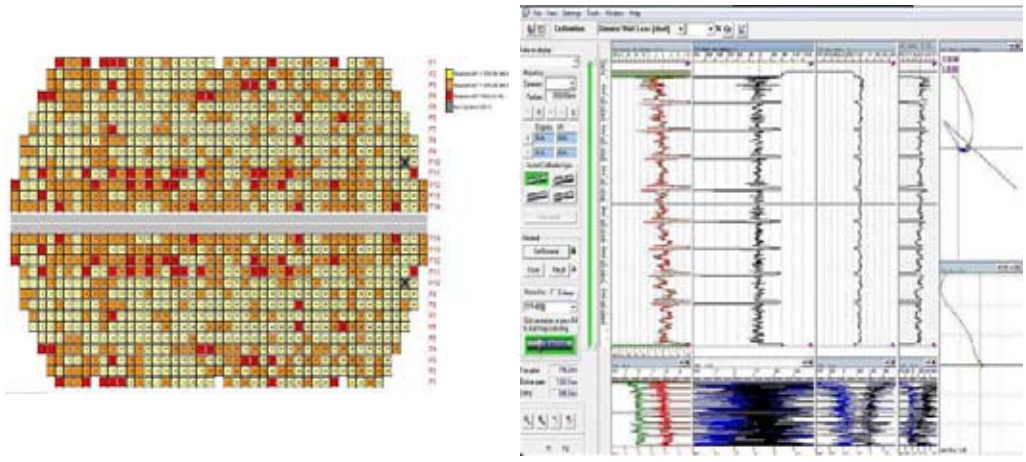


Fig.7 – Esempio di rintracciabilità tubo grafico: a sx schema del particolare analizzato, organizzato in numerazione sequenziale dei tubi controllati, a dx grafico di controllo del tubo nr.1 nella fila F1

Buona prassi prima degli interventi sul campo è lo studio dei componenti tecnologici da controllare e la progettazione della campagna delle misure, cercando di prevedere e organizzare situazioni di difficoltà ed eventualmente di criticità. Una delle componenti di maggior incremento di costo, al di là degli ammortamenti dei macchinari e delle remunerazioni delle risorse umane, è rappresentato proprio dalla disorganizzazione delle attività sul campo, spesse relegate in un secondo piano, ma sempre più frequentemente fonte di spesa non indifferente, cosa che fa giudicare (spesso a torto) i controlli non distruttivi costosi e poco rispondenti ad esigenze di costi/benefici ammissibili.

3.3 Anomalie e discontinuità rilevate

I quattro anni di monitoraggio su un numero così importante di tubazioni utilizzate in diverse condizioni di esercizio, ha consentito di ricavare un quadro significativo dell'evolversi delle condizioni di conservazioni di tubazioni in esercizio, in convergenza con quelle che sono le linee di indirizzo che hanno ispirato l'estensione dell'art.16 del D.M. 329/04.

Da un lato infatti si è in possesso di una consistente mole di informazioni su tubazioni che sono in esercizio da diverso tempo: nel caso di studio proposto si sono organizzati i dati secondo tre segmenti di vetustà di lavoro delle installazioni:

- Tubazioni con più di 5 anni di esercizio fino a un massimo di 10 anni,
- Tubazioni in esercizio da oltre 10 anni fino a 15;
- Tubazioni con una "anzianità" di servizio oltre a 15 anni.

Dall'altro si è invece maturata un'ampia casistica di situazioni di lavoro che possono fornire un quadro attendibile sulla durabilità delle tubazioni in esercizio.

Va sottolineato però che il presente lavoro non può avere la pretesa di rappresentare un campione con una oggettiva significatività statistica e pertanto i risultati di seguito esposti in forma sintetica non possono essere presi come dati proiettabili sul parco nazionale delle tubazioni in esercizio. E' pur vero però che il numero di controlli non distruttivi realizzati con questa tecnica innovativa sono consistenti e il panorama di risultati ottenuti dà la possibilità di esprimere alcuni commenti con un accettabile significato tecnico.

Prima di passare ad alcuni dati sui risultati ottenuti da questa mole di misure, è opportuno fare riferimento alla classificazione utilizzata per l'analisi di conformità; sono stati ritenuti:

1. "conformi" tubazioni che presentavano riduzioni dello spessore di parete comunque inferiori al 15% dello spessore nominale di produzione;
2. "conformi ma da rivedere in tempi brevi" tubazioni con riduzione di spessore fra il 15 e il 25%;
3. "critici" tubazioni con riduzione di spessore fra il 25 e il 35%;
4. "non conformi" tubazioni con riduzione di spessore oltre il 35%;
5. "non conformi" tubazioni con difetti su parete interna o esterna;
6. "non ispezionabili" tubazioni con tubi tappati e deformati in modo da non consentire l'ingresso della sonda.

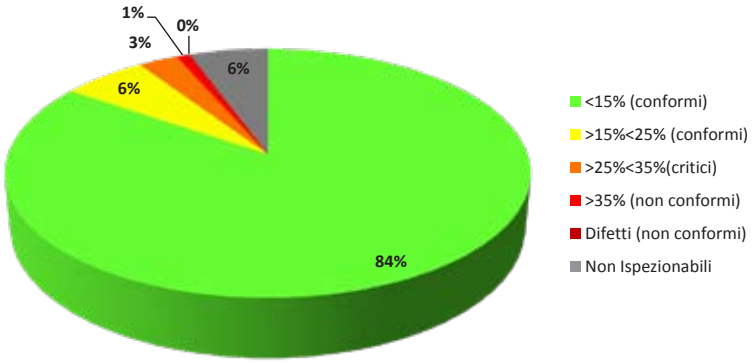


Fig.8 – Distribuzione della conformità nelle tubazioni analizzate

Come si vede dal precedente grafico in fig. 8, la conformità arriva a circa il 90% del parco installato, mentre del rimanente 10% circa un terzo si trova in una situazione di indecisione con evidenti criticità ma ancora con una possibile vita residua, mentre una larga parte è inutilizzabile e un'ulteriore minima parte evidenzia una chiara non-conformità.

Da un punto di vista della pura durabilità della produzione di tubazioni evidentemente esiste un giudizio più che positivo, poiché una larga parte di parco installato supera i controlli effettuati. Ma una parte non trascurabile di elementi evidenzia criticità, evidenziabili purtroppo solo grazie a interventi di controllo di qualità e quindi anche di costo non trascurabile.

Sul totale dei tubi ispezionati, lo 0,95% sono stati giudicati non conformi (vedi tipologie in fig. 9), l' 8.9% con principio di erosione e/o corrosione (vedi fig. 10) e il 5,62% dei tubi risultano tappati e quindi non ispezionabili (vedi fig.11).

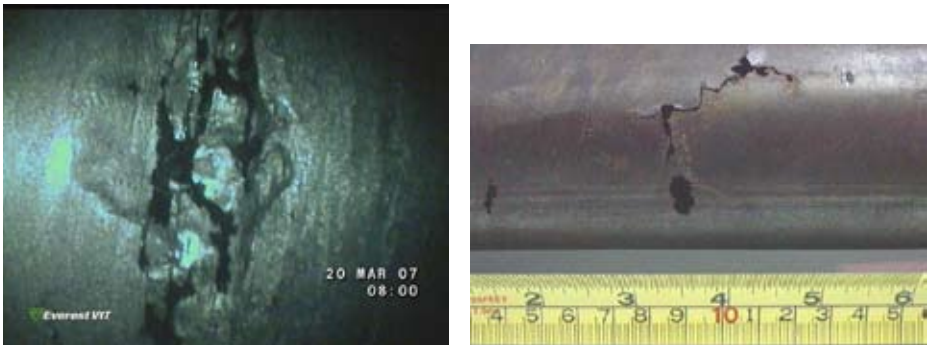


Fig. 9 – Esempi di difetti interni rilevati con ET e RFT

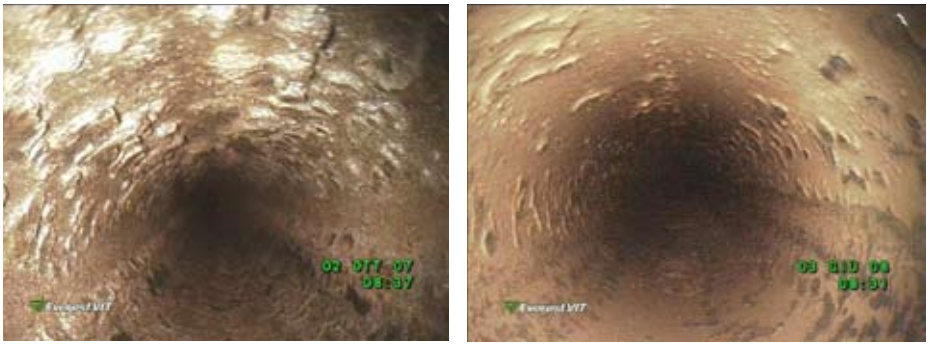


Fig. 10 – Esempi di stato corrosivo rilevati con ET e RFT



Fig. 11 – Esempio di tubi tappati e non ispezionabili con ET e RFT

Meglio di tante parole le fotografie su esposte chiariscono le tipologie di difetti che vengono rilevate con i controlli non distruttivi di tipo ET e RFT e ben si comprende come tali misure possono rispondere a esigenze di verifica spesso non risolvibili con altri metodi. In particolare i controlli spessorimetrici con ultrasuoni si rilevano insufficienti per tubazioni a causa della loro discontinuità di misura e per l'esigenza di accessibilità dall'esterno, spesso interdetta dalla vicinanza di altri tubi (es. fasci tubieri di scambiatori o generatori di vapore a tubi di fumo) a da articolati isolamenti termici e meccanici.

3.4 Risultati e stato di conservazione

L'ampia documentazione informativa delle numerose campagne di misura consentono molte e interessanti elaborazioni, ma ai fini di un primo inquadramento dello stato di conservazione delle tubazioni in servizio secondo gli indirizzi espressi all'art. 16 del D.M. 329/04 si propone come detto una segmentazione che organizzi i dati raccolti secondo il tempo di servizio delle tubazioni controllate nel seguente quadro:

- "anzianità" di servizio fra 5 e 10 anni
- fra 10 e 15 anni
- oltre 15 anni.

Il campione di studio viene quindi segmentato in tre fasce, la cui distribuzione percentuale viene riassunta nella seguente figura.

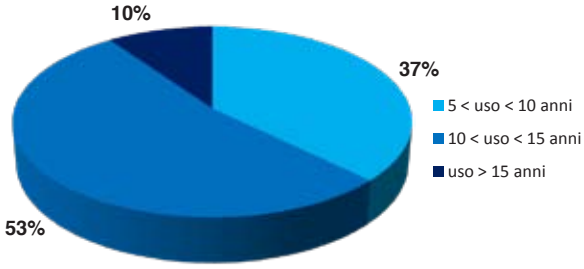


Fig.12 – Distribuzione del tempo di servizio nelle tubazioni analizzate

Analogamente il complesso dei dati relativi alle misure organizzate viene segmentato secondo le tre fasce proposte ottenendo le seguenti tabelle:

	< 15% conformi	>15% <25% conformi	>25% <35% critici	> 35% non conformi	Difetti non conformi	Non Ispezionabili
5 < uso < 10 anni	8905	0	0	0	5	1443
10 < uso < 15 anni	13358	1002	216	73	3	78
uso > 15 anni	1242	688	570	180	3	41

	< 15% conformi	>15% <25% conformi	>25% <35% critici	> 35% non conformi	Difetti non conformi	Non Ispezionabili
Totale	23505	1690	786	253	11	1562

Tab. 1 – Distribuzione della conformità in relazione all'uso delle tubazioni

Per meglio comprendere i risultati ottenuti, si propone una elaborazione in forma grafica della figura 8 che consente di avere in tempi rapidi un impatto visivo che meglio consente un commento rispetto a tab. 1.

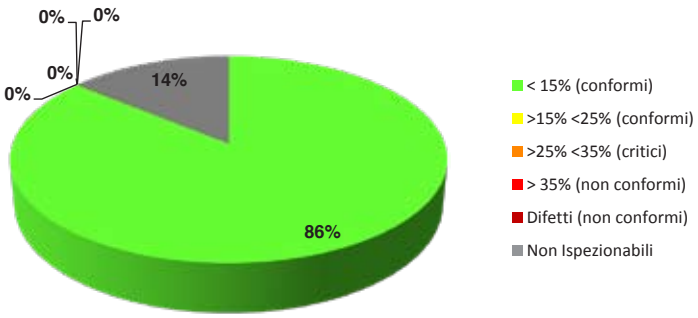


Fig.13 – Distribuzione della conformità nelle tubazioni analizzate con età fra 5 e 10 anni

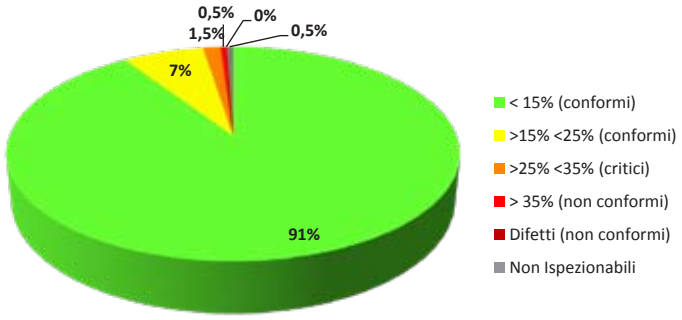


Fig.14 – Distribuzione della conformità nelle tubazioni analizzate con età fra 10 e 15 anni

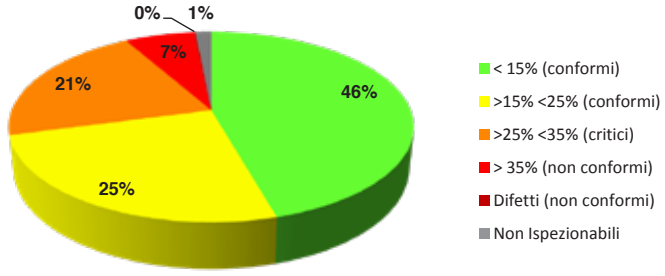


Fig.15 – Distribuzione della conformità nelle tubazioni analizzate con età oltre i 15 anni

I risultati ottenuti non si discostano molto dalla attese e quasi ci fanno sembrare tutta questa raccolta di dati un po' scontata, ma in realtà le informazioni così organizzate risultano molto preziose, proprio perché confermano attività già in essere nella prassi dei controlli attivi nel nostro sistema produttivo.

Prima di tutto la figura 14 evidenzia come a partire dal decimo anno di esercizio compaia un sensibile incremento di erosione/corrosione e di difetti, corrispondente normalmente all'attivazione della verifica di integrità secondo le prescrizioni del DM 329/04. In più la tabella 15 evidenzia una maggiore presenza di non conformità per tubazioni in servizio da più di 15 anni, anche se esiste una importante area di criticità su cui è opportuno un maggior approfondimento. Infatti una progettazione più sensibile alla durabilità dei prodotti potrebbe consentire di portare quest'area di criticità in area di sicurezza qualora il dimensionamento degli spessori fosse stato fatto considerandone anche il loro consumo nel tempo. Ciò è spesso verificato in

prodotti di una certa età dove i margini di tolleranza produttiva obbligavano a sovradimensionare i materiali utilizzati. La recentissima tecnologia permette un preciso controllo della produzione e esigenze di contenimento dei costi spesso portano a limitare allo stretto indispensabile il materiale presente nelle apparecchiature.

Una corretta applicazione dell'art.16 del DM 329/04 dovrebbe tenere in considerazione anche aspetti di carattere produttivo e anche procedere ad analisi di riqualificazione sulla base dei risultati ottenuti. L'uso di tecnologie di controlli affidabili a supporto della riqualificazione periodica d'integrità assume quindi un aspetto cruciale per riportare nel parco installato un livello di sicurezza accettabile anche dopo l'introduzione nel campo delle apparecchiature controllate da parte della PED di elementi una volta esclusi come le tubazioni. L'uso più diffuso dei CND con ET e RFT risponde in maniera coerente a questa esigenza.

Un'ultima riflessione sulla tabella 13: la presenza di difetti di produzione sfuggiti ai controlli di qualità prima della diffusione sul mercato si evidenziano subito nei primi 10 anni di vita, con un buon 14% di tubi ormai inattivi probabilmente collassati già nei primi anni. Tale data relativo all'incapacità di produrre la propria funzione viene poi relegato a valori fisiologici.

4. CONSIDERAZIONI FINALI

Proprio questa aderenza dei risultati alle attese, oltre a confermare la bontà della prassi in essere e la necessità di provvedere a controlli efficaci sul parco installato introdotto nei controlli dalla PED, avvalora inoltre l'efficacia e l'efficienza dell'uso di ET e RFT in campi applicativi dei CND proprio sulle tubazioni. Qualità e tempo sono stati gli elementi caratteristici per sviluppare un numero così consistente di misure su un parco di tubazioni così ampio, ma soprattutto la tecnologia utilizzata è risultata indispensabile per dare affidabilità al giudizio di conformità da assegnare.

Rimane però un'ultima considerazione di forte criticità sul metodo discusso nel presente articolo, che riguarda il personale utilizzato, in quanto tali tecniche CND, pur essendo semplici nella praticità, sono di non facile interpretazione nell'analisi dei risultati ottenuti.

Pertanto è necessario che il personale abbia non solo le basi fisiche del controllo già considerate in qualifica (120 h di teoria), ma un ulteriore affiancamento in campo, atto a giudicare eventuali falsi segnali ottenuti per esempio da una non corretta pulizia interna della parte da ispezionare.

Tale criticità rappresenta oggi un chiaro ostacolo alla diffusione dei metodi proposti, che, oltre a prevedere un consistente impegno per l'acquisto dei macchinari, deve prevedere un forte investimento in risorse umane.

sessione TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

Efficacia ispettiva e solidità della metodica "XRD in loco" per il rilevamento di potenziali fenomeni a creep

*G. Berti**
*F. De Marco***
*D. Pinciroli****

**Università di Pisa*
***XRD-Tools s.r.l.*
****Ansaldo Caldaie*

1. SOMMARIO

Il presente lavoro prosegue l'indagine su componenti realizzati con materiale secondo Code Case ASME CC 2179-7, tipo T92; in particolare si riferiscono gli sviluppi analitici su un provino ASME SA 213 T92, considerato un acciaio legato al Cromo (9%Cr) di tipo martensitico. Il provino presentava una significativa saldatura di testa. Su detto provino sono stati scelti un paio di allineamenti longitudinali all'asse e trasversali alla saldatura per raccogliere dati mediante il DifRob, il prototipo realizzato da Università di Pisa su contratto ISPESL (42/98) per analisi diffrattometriche in loco. I risultati che emergono confermano la buona qualità dello strumento; permettono di confrontare i dati ottenuti a due anni di distanza con quelli ottenuti nel presente lavoro. I risultati indicano la buona qualità del sistema d'interpretazione realizzato che, oltre ad evidenziare modulazioni del fondo, identifica claster di picchi. L'inviluppo del claster è stato considerato come "profilo medio equivalente" ed utilizzato per delineare una possibile mappatura del parametro reticolare sulla superficie esterna del provino. La decomposizione del segnale indica la presenza di soluzioni solide degli elementi di base con presenza di carburi in un composto complesso che richiede maggiori approfondimenti. Il tutto delinea la quantità e qualità del lavoro fin qui realizzato e sollecita, per detti approfondimenti l'adesione dei produttori e degli utilizzatori ad gruppo di sperimentazione in loco capace di definire i veri elementi di riferimento del materiale qualificato per l'uso e non solo caratterizzato nei laboratori di ricerca. La differenza è tutt'altro che sottile e giustifica la richiesta di uno sforzo comune tra ricercatori, produttori e utilizzatori perché tratta la definizione dell'origine, i.e. il punto zero della scala per la misura di una grandezza (il creep) ragionevolmente complessa.

2. INTRODUZIONE

Praticità empirica ed immediatezza della risposta sono alcuni dei molti requisiti necessari alla determinazione precoce dei fenomeni a creep che si manifestano su componenti industriali sottoposti a forti carichi o gradienti termici.

Lo scorrimento viscoso a caldo, con cui spesso si denomina il creep, indica una visione d'insieme del fenomeno che ha invece un'origine alla scala di frazioni di nanometri. Ne segue che i requisiti citati spesso riescono a delineare comportamenti indicativi e raramente risolutivi del fenomeno.

Detto limite è particolarmente stringente quando sono richieste valutazioni di vita residua del componente; per superarlo e raggiungere obiettivi così ambiziosi, occorrono metodiche e tecnologie capaci di osservare la scala dei reticoli atomici e della composizione chimica ad

una scala molto piccola. Quindi occorre puntare sulla potenza delle teorie matematiche e sulla completa descrizione della fisica associata ad una misura di creep. La diffrazione a raggi x in loco ("on site XRD") ha i requisiti per raggiungere questi obiettivi.

Il presente lavoro riprende alcuni risultati presentati nel precedente SAFAP 2008 [1], ne approfondisce alcuni aspetti, indicando la direzione intrapresa per vincere, attraverso passi successivi la sfida dell'uso della metodologia XRD sui componenti in servizio (*fitness for service*). La componentistica degli impianti moderni e degli elementi costituivi (tra questi è incluso il materiale) assumono una varietà geometrica così ampia da renderne complicata la dimostrazione preliminare. Senza il coinvolgimento responsabile e diretto dell'utilizzatore finale e del produttore iniziale ogni elaborazione numerica dei dati raccolti può risultare astratta sia pure ricca d'informazioni per un sapiente esercizio formativo di professionalità.

L'ambizione di questo lavoro dunque punta a sollecitare l'attenzione dei produttori, degli utilizzatori finali e dei servizi di manutenzione e riparazione affinchè si generi un cluster di competenze convergenti alla praticità ed immediatezza del rilevamento del fenomeno a creep direttamente sugli impianti.

3. MISURE ED OSSERVAZIONI

Nel precedente lavoro citato è stato preso in considerazione un tronco di tubo cilindrico di Diametro Esterno di 44,5mm e spessore minimo pari a 7,1 mm (spessore medio o "actual" di circa 8 mm). Il provino è in materiale ASME SA 213 T92, un acciaio legato al cromo 9%Cr di tipo martensitico ed è caratterizzato dalla presenza di una importante saldatura di testa.



Figura 1: Dimensioni relative del provino ASME SA 213 T92

L'attenzione è stata attratta da punti vicino alla saldatura su cui sono state condotte alcune raccolte di dati con il DifRob, strumento citato sin dal precedente SAFAP (Roma 2006) [2]. Furono inizialmente individuati due allineamenti su cui eseguire misure preliminari e riportati nel lavoro citato e presentato a SAFAP (Cagliari 2008) [1]. I risultati della raccolta dei diversi irraggiamenti ottenuti da uno dei due allineamenti (il punti 1 per menzione del precedente lavoro [1] è riportato in Figura 2.

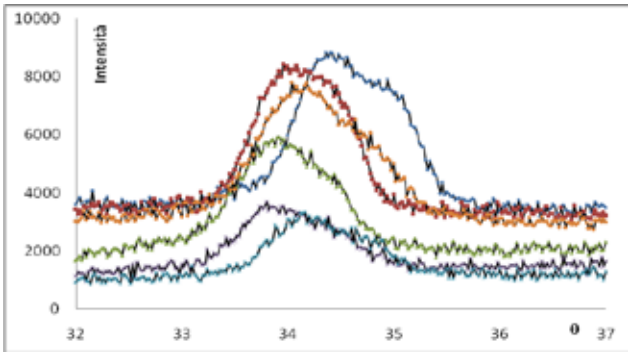


Figura 2: confronto della distribuzione d'intensità delle linee di diffrazione ottenute a diverse distanze dal centro della saldatura I dati si riferiscono al Punto 1 di Tabella 2, [1].

Punto 1	**I**	**θ**
15mm	2838,16	**34,3129**
5mm	2734,86	**33,9837**
2mm	2009,21	**33,7877**
1mm	1282,72	33,8466
bordo	1228,41	34,0683
centro	2287,56	33,9959
Punto 2	**I**	**θ**
15 mm	2469,57	34,9258
5 mm	1861,82	34,4901
2 mm	1470,92	34,3358
1 mm	563,436	34,4745
bordo	648,831	34,702
centro	1751,61	34,6315

Tabella 1: Valori ottenuti dalla interpolazione dei dati di Figura 2.

Tutta la raccolta di dati aveva evidenziato una notevole variabilità nei parametri di profilo delle linee di diffrazione. In particolare la posizione della linea era stata utilizzata per calcolare il parametro reticolare medio; il suo valore era poi stato distribuito sulla distanza dal centro della saldatura. La Fig. 2 riporta a titolo di esempio indicativo il confronto delle distribuzioni d'intensità, da cui si evince la variazione dei parametri di profilo. La Tabella 1 riporta i valori d'intensità di posizione della linea di diffrazione delle differenti raccolte di dati ottenute sui due punti selezionati nell'intorno della saldatura del tubo già definita nel lavoro citato [1]. I valori di tabella 1 sono stati ottenuti mediante un sistema d'interpolazione vincolato denominato DISVAR96, revisione del precedente DISVA93, [3], che riporta anche i valori di FWHM ed gli altri parametri dei contributi strumentali, la cui trattazione è al momento fuori dagli obiettivi del lavoro.

Nell'ambito del presente lavoro due nuovi allineamenti sono stati identificati diversi dai precedenti e condotti con maggiore sistematicità, dotando lo strumento di miglioramento della precisione dello spot di cui daremo dettagli più avanti. Interessa sottolineare oggi che dopo due anni di distanza lo steso strumento e lo stesso tubo sono stati utilizzati da un diverso operatore, dopo aver superato un training significativo di laboratorio.

La Figura 3 riporta i valore del parametro reticolare (d-spacing) in funzione della distanza dal centro della saldatura. Ricordiamo che il d-spacing si ottiene dalla soluzione dell'equazione di Bragg ed ha la funzione di evidenziare elongazioni e compressioni attive sul reticolo di lega; reagisce come uno *strain gauge* naturale in modo molto più efficace di qualsiasi altro simile dispositivo perché risulta da un lato attivato direttamente dai carichi meccanici e termici a cui è sottoposto; dall'altro controre azionato dalla reologia chimico fisica della composizione in lega

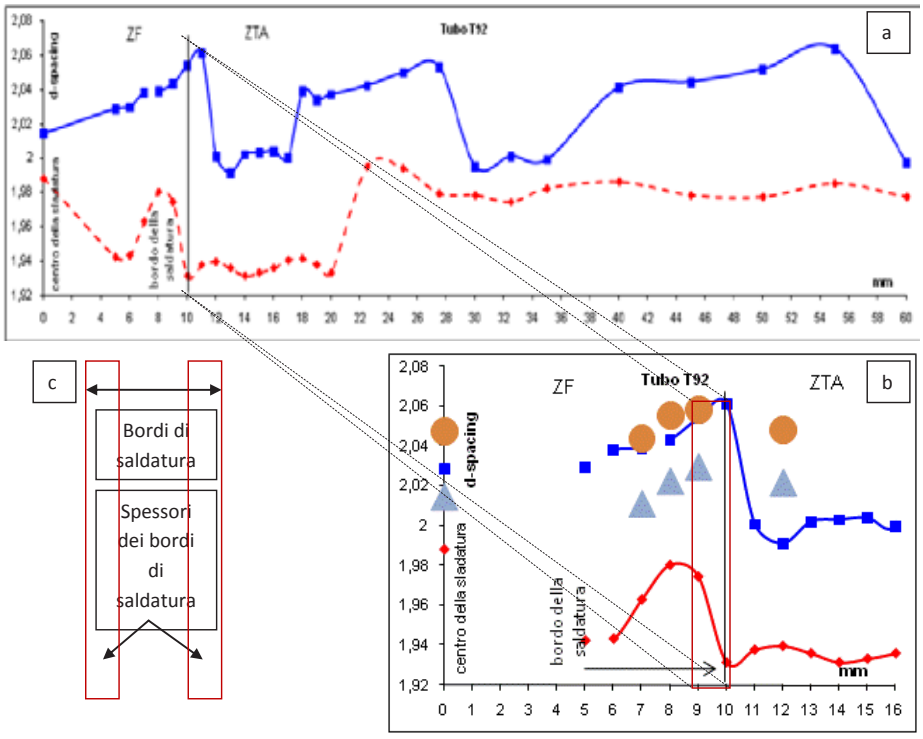


Figura 3: Valore del parametro reticolare (d-spacing) vs. la distanza dal centro della saldatura in mm. I dati sono stati raccolti seguendo due allineamenti paralleli all'asse del provino (a). Particolare intorno al bordo della saldatura; sono stati aggiunti i dati (cerchio pieno e triangolo pieno) già riportati nel lavoro citato [1]; le dimensioni relative degli indicatori delle due raccolte sono in relazione alle diverse dimensioni dello spot utilizzato; una tolleranza di 3 1 mm nel posizionamento dello spot è stata utilizzata per evidenziare le similarità delle diverse raccolte di dati ed la mappatura del d-spacing sul bordo della saldatura, identificandone le dimensioni spaziali (b); schema dei bordi di saldatura compatibili con le immagini radiografiche (c).

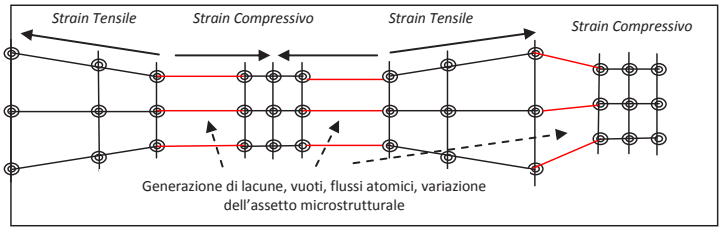


Figura 4: Arrangiamento del reticolo medio equivalente [4] con repentine variazioni del valore del parametro reticolare (d-spacing). Il d-spacing è direttamente coinvolto nel calcolo delle tensioni residue in MP vedi Norma EN 15305 [5].

Dei due allineamenti campionati in Fig. 3, uno presenta una sostanziale regolarità di valori del d-spacing per distanze superiori ai 28 mm dal centro della saldatura e che, in questo contesto iniziale di osservazione, viene preso come materiale base.

L'altro, nella stessa regione"lontana dalla saldatura" presenta invece una larga oscillazione in aumento del d-spacing, come si fosse in presenza di una tensione residua, magari di lavorazione e/o di forma del componente. Questa larga oscillazione condiziona però l'assetto reticolare avvicinandosi alla zona termicamente alterata; questo condizionamento avviene attraverso una sequenza di diminuzione-aumento del d-spacing, generando condizioni potenziale infragilimento.

Nella zona dai 30 ai 18 mm di distanza dal centro saldatura si osserva in entrambe gli allineamenti una sequenza di crescita decrescita che va poi ad accordarsi con la zona termicamente alterata per poi finire nella zona fusa attraverso un nuovo significativo balzo dei valori del d-spacing.

Interessa notare in questa ultima circostanza la ricorrenza dei valori di d-spacing nel margine della saldatura come riportati in Figura 3a. Un aggiustamento reciproco in ragione di 31 mm di tolleranza nel posizionamento dello spot strumentale in Fig. 3, riporta il dettaglio del grafico di Fig. 3 nella zona di transizione tra zona termicamente alterata e zona fusa.

Su questo stesso grafico di Fig.3a sono stati riportati anche i valori del d-spacing dedotti dalla raccolte del lavoro precedente [1] e dei cui abbiamo già riferito in Fig. 1.

La stabilità dello strumento è significativa ed anche una significativa concordanza dell'assetto reticolare (dedotto dal d-spacing) può essere rilevata.

L'applicazione della tolleranza in Fig 3a offre al concetto di "bordo della saldatura" il significato di dimensione fisica che può essere compreso tra 9 e 10 mm dal centro della saldatura stessa. Se ne deduce un metodo per definire una qualità dell'esito del processo di saldatura come potenziale elemento d'innesco di danneggiamenti che può essere correlato all'ispezione a mezzo radiografia il cui schema è riportato in Figura 3b ed è stato ricavato dalla radiografia del giunto GKj903900 gentilmente concessa da Ansaldo caldaie di Gioia del Colle.

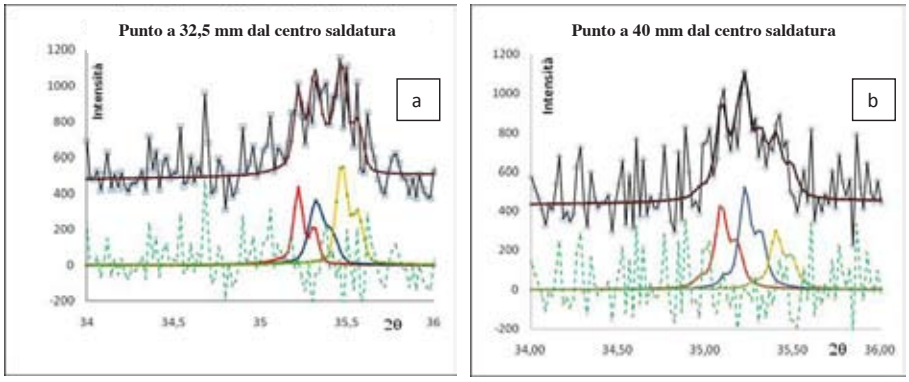


Figura 5: cluster osservati a due diverse distanze dalla saldatura ed i cui punti sono cerchiati in Fig. 3a. Distanza a 32,5 mm (a); distanza a 40 mm (b) dal centro della saldatura. Si distingue il profilo d'interpolazione (i.e. profilo medio equivalente, usato per definire gli allineamenti di cui sopra e si distinguono le linee di diffrazione prodotte dai carburi e dedotte dal processo di decomposizione del segnale.

I valori della posizione di linea della diffrazione usati per il calcolo del d-spacing di Fig. 3 e 3a sono stati ricavati dall'interpolazione dei profili come quelli esemplificati in Fig.1. Ognuno di detti profili è in realtà un cluster costituito da più linee di diffrazione; ognuna di esse contiene le componenti $K\alpha_1$ e $K\alpha_2$. Nel caso Nella Fig. 3a gli indicatori a cerchio e triangolo si riferiscono alle osservazioni già riportate nel lavoro citato e di cui la Fig. 1 rappresenta la sequenza di allineamento detto Punto 1, [1]. La dimensione dell'indicatore richiama l'attenzione alle dimensioni dello spot; in quell'occasione lo spot aveva una forma rettangolare di 0,5 x 3 mm ed era privo del diaframma circolare con apertura di 0,75 mm con cui è stato dotato lo strumento per le raccolte del presente lavoro.

I dati di Figura 5a e Figura 5b riportano in nero i risultati dell'osservazione diretta del DifRob, il cui inviluppo è utilizzato per identificare le posizioni medie del cluster e calcolare i relativi d-spacing medi di Fig.3. In Fig 5a e Fig. 5b la linea marrone indica la distribuzione dei valore d'interpolazione (best least square fitting secondo il criterio del χ^2), la linea tratteggiata verde indica la differenza tra i dati osservati e la linea di best fitting.

I tre profili centrali in colore rosso, blu e giallo hanno posizioni compatibili con la composizione di carburi del tipo M_xCy, M_wC_z [6], dove x,y,w, z sono indici di composizioni di carburi a fase multipla, dove C rappresenta la componente in Carbonio ed in M sono presenti i diversi elementi di composizione dell'acciaio di gradi T92, come riportato in diversi disciplinari e norme, di cui qui riferiamo solo alcune [7], [8], [9]. Tenendo conto delle radiazioni $CrK\alpha_{1,2}$, $CrK\beta$, usate per la raccolta dei, e del fatto che le coordinate relative di macchina, solo verificate e non calibrate a questo stadio della sperimentazione, i carburi osservati sono compatibili con in valori x=23, y=6 e w=7, z=3.

3.1 potenzialità della metodologia e qualità tecnologiche

I profili dei carburi evidenziati nelle Fig. 5a e 5b emergono come decomposizione della rappresentazione del segnale diffrattometrico, eseguita mediante il sistema DisVar 96 [3] e l'analisi della consistenza interna [7]. Le componenti che emergono, oltre a delineare il fondo del segnale ed i diversi picchi contenuti nel segmento di diffrattogramma analizzato, identificano anche i parametri di profilo per ognuno dei picchi identificati. I parametri di profilo sono l'intensità, la posizione della linea di diffrazione (angolo di Bragg), la larghezza a metà altezza (FWHM), un parametro di forma del profilo, oltre ad alcuni parametri che determinano il contributo strumentale alla funzione di rappresentazione interpolante.

32,5 mm dal centro saldatura

I	P	FWHM	2θ	SH3	SI3	I3/I1
398	0.789	0.0600	35,22	0.050	0.234	0.099
328	0.778	0.0880	35,32	0.050	0.238	0.077
547	0.754	0.0714	35,47	0.050	0.516	0.029
Parametri	Fondo:	B1=100.45	B2= 1.1	e+01 B3=	-3.540e	+00 B4= 0.000
χ2=33	0,287′					

A 40 mm dal centro saldatura

I	P	FWHM	2θ	SH3	SI3	I3/I1
411	0.209	0.0774	35.087	0.120	0.072	0.098
498	0.214	0.0752	35.223	0.120	0.041	0.088
281	0.212	0.0777	35.400	0.120	0.070	0.088
Parametri	Fondo:	B1=102.11	B2= 9.7	e+00 B3=	-3.500e	+00 B4=70.000
χ2=35	0.918694					

Tabella 2: parametri di profilo ottenuti per decomposizione del "profilo medio equivalente" e riportati in Fig. 5a e 5 b.

La Tabella 2 riporta i risultati dei parametri di profilo interpolanti e calcolati dal sistema di ottimizzazione vincolato e ristretto presente nel sistema DISVAR96, [3].

I punti scelti per questa elaborazione preliminare sono lontani dalle zone di alterazione e testimoniano la sensibilità delle tecnologia DifRob sviluppata dall'Università di Pisa e dello strumento realizzato con il contributo ISPESL 42/98.e del metodo di elaborazione dei dati anch'esso sviluppato dall'Università di Pisa.

I parametri riportati in Tabella 2 sono utilizzabili per il calcolo del creep nell'equazione di potenza [1]. Al presente stadio della sperimentazione interessa enfatizzare che il componente in studio non è un componente esercito. La presenza di una saldatura importante puo' avere influenzato il riassetto reticolare modificando la mappa delle tensioni residue originali del processo di fabbricazione, sia in termini di composizione chimica sia in termini di geometria del componente.

La variazione di composizione di carburi e la variazione dell'assetto micro strutturale nelle zone lontane dall'effetto di alterazione contribuisce alla generazione di cluster che descrivono un reticolo medio equivalente [4], [10] la cui rappresentazione risulta in un "profilo medio equivalente" delle linee di diffrazione aggregate in un cluster che può apparire come in Fig. 2. Il cluster è il risultato delle piccole variazioni del d-spacing rilevate nei cerchietti di Fig. 3a.

Questi profili medi equivalenti possono essere decomposti, portando ad identificare zone a differente dimensionalità micro strutturale, in cui la presenza di Fe e Cr, ad esempio porta a soluzioni solide degli elementi presenti, e, in presenza di Carbonio alla costituzioni di carburi in miscela di detta soluzione solida e con una complessa struttura cristallina cubica a facce centrate [6].

3.2 Assetto strumentale e tecnologia di misura

Il raggiungimento dei risultati descritti è stato possibile adottando le seguenti specifiche di raccolta effettuate con il DifRob: Tubo RX al Cromo con potenza di funzionamento a 450KW (i.e. 30 KV e 15 mA), geometria della sorgente di tipo a fuoco lineare e dotato di un diaframma circolare di un millimetro a filtro di Vanadio.

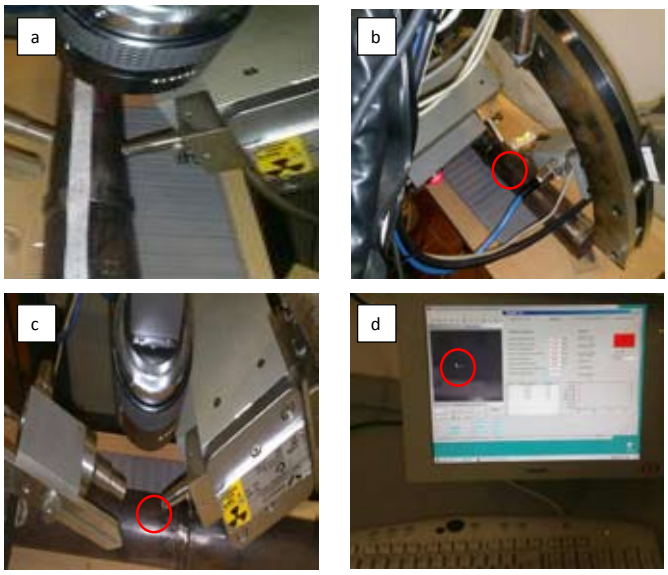


Figura 6: Sequenza dell'assetto del DifRob sulla lunghezza del tubo e scala utilizzata per gli spostamenti longitudinali e millimetrici (a). Localizzazione dello spot (i.e. puntino rosso indicato all'interno del cerchio rosso (b), (c) e (d). Otturatore e laser di puntamento (c), CCD camera di ripresa ottica (a), (b) ed esito di ripresa (d). Finestra dell'interfacci grafica relativa alla fase di misura presente sullo schermo della consolle di controllo, insieme a assetto delle condizioni di misura, assetto dello strumento, raccolta dati corrente visualizzata sia in tabella sia in grafica bidimensionale (l,θ).

La scansione è stata fatta nell'intervallo 32-37 gradi in θ in unità di macchina, con passi da 0,02° in θ e durata di 10sec./step. Lo strumento è già stato descritto nelle sue linee generali [1],[2]. Si presenta qui in Figura 6a, 6b, 6c, 6d, l'applicazione al tipo di componente utilizzato, già descritto in Fig. 1 e l'assetto completo dello strumento e della consolle in fase di raccolta dati.

4. CONCLUSIONI

Il lavoro presentato prosegue l'attività precedente condotta dall'Università di Pisa e da XRD-Tools nata come spin off accademico per accelerare l'ingresso della metodica nel contesto civile. La metodica XRD conferma la sua peculiare attitudine ad analizzare effetti alla scala nanometrica ed indizi per osservare il comportamento a creep e la sua propagazione nei metalli sottoposti a scorrimento viscoso a caldo. I risultati indicano la validità della via intrapresa per eseguire misure fuori dai laboratori ("on site XRD") e possibilmente sui componenti in esercizio. Gradualmente si devono ottenere conferme sulle potenzialità d'identificare eventuali presenze di trasformazioni di fase e/o coesistenza di fasi martensitiche- austenitiche. Già nelle conclusioni del precedente lavoro più volte citato [1] si riferivano le ambiziose prospettive ed i limiti con cui l'applicazione oggi si scontra e che di nuovo riportiamo perché non risolti: *a) i valori di riferimento da prendere come origine per la valutazione delle caratteristiche strutturali dei metalli, b) gli effetti legati all'ossidazione in presenza di scorrimento viscoso a caldo e la non ancora del tutto definita accuratezza dei modelli di ossidazione* [11], [12]. Occorre investire verso la raccolta dei dati in campo e/o sui componenti per verificare i modelli predittivi del tempo di rottura del materiale basata su simulazione e/o di comparazione per estensione. La tecnologia utilizzata, sebbene richieda ulteriori investimenti per raffinamenti e specializzazioni fornisce risultati adatti a colmare queste lacune e ad osservare il funzionamento dei punti critici su componenti in esercizio. Risulta pertanto un potente strumento, in vista personalizzazioni industriali, per individuare effetti microstrutturali, di tensione residua, di rugosità superficiale come elemento d'indagine e di qualificazione del materiale per l'uso.

Il presente lavoro riporta le indagini condotte su porzioni di componenti industriali con particolare attenzione ad acciai di tipo e grado T92. Interessa qui sottolineare: la versatilità della metodica ad essere e la sua adattabilità alle geometrie dei diversi tipi di componenti e dei materiali di cui essi sono costituiti.

I risultati ottenuti evidenziano inequivocabili variazione dei parametri del profilo di diffrazione (posizione del massimo, allargamento e variazione della forma) che, fatta salva la significatività delle osservazioni e la loro consistenza interna, sono indicative di variazioni dell'assetto reticolare. Tali variazioni sono riconducibili a deformazioni indotte dalla variazione delle condizioni al contorno. Nel caso del componente esaminato, il processo di fabbricazione induce alcune caratteristiche chimiche e fisiche nella composizione del materiale e nella mappatura delle tensioni residue distribuite sulla sua superficie. Questa mappatura può essere ricostruita attraverso la raccolta di dati su una serie di allineamenti e che risulta fortemente influenzata da presenza della saldature a testa. La determinazione del parametro reticolare (d-spacing) risulta determinante per il calcolo delle tensioni residue che può essere eseguito secondo norma [5] e non calcolato in questa fase perché fuori dagli scopi specifici attuali.

L'analisi della struttura fine dei profili di diffrazione induce a decomporre il segnale nei componenti elementari; permette d'identificare la presenza di soluzioni solide dei componenti di base e la costituzione di carburi (e.g. M23C6), che hanno un ruolo nella mappatura del d-spacing. I parametri di forma e di larghezza dei profili concorrono alla definizione dei modi di aggregazione dei complessi composti dotati che si generano e di organizzano in forme micro strutturali a varia dimensionalità. Il monitoraggio sul posto dei punti critici potrà indicare le variazioni di questa dimensionalità evidenziando eventuali rischi.

Ma questa evidenza sarà possibile solo sulla base di un percorso che definisca i valori di riferimento specifici, non tanto del materiale caratterizzato in laboratorio, ma del componente qualificato per l'uso. In questo modo sarà possibile identificare scenari di formazione del creep, separando quelli a maggiore potenziale deformativo strutturale (poligonalizzazione) da quelli a maggiore potenziale microstrutturale accompagnato dalla ricombinazione atomica in fasi secondarie.

I risultati fin qui ottenuti delineano il successo del percorso eseguito e delineano in modo chiaro il tratto ancora rimanente da compiere per raffinare la tecnologia, migliorare la determinazione delle grandezze utili alla diagnosi precoce dei fenomeni a creep.

Oltre l'aspetto esteriore ed in qualche misura spettacolare che si evince dalle funzionalità robotiche del macchinario in sé, esiste una profonda trasformazione della conoscenza della fisica della diffrazione a raggi x che deve essere gradualmente trasferita a dette funzionalità. Anche questo percorso è già delineato. Oggi l'interazione tra macchina ed operatore è una inevitabile "simbiosi" che rimane al livello del prototipo attuale. Il superamento di questo limite apparente

richiede la definizione di obiettivi applicativi specifici (quale impianto, quale materiale) nonché la condivisione di obiettivi specifici (customizzazione del strumento al servizio) per la qualificazione, riqualificazione.

RINGRAZIAMENTI

Ringraziamenti vanno ad Ansaldo Caldaie, agli addetti dello stabilimento di Gioia del Colle, al Dr. Roberto Crudeli di CND Service per interessanti scambio di opinioni.

Ai collaboratori a progetto ed ai Tirocinanti in XRD-Tools ed ai Laureandi dell'Università di Pisa che, frequentando il Laboratorio di Ricerca e Sviluppo della Diffrazione a Raggi X, a diverso titolo, hanno contribuito alle prove di concetto, Antonio Nicoletta, Fabio Tronci, Maria Eva del Seppia e Silvio Di Vito, va una speciale citazione.

Lo strumento utilizzato per eseguire le prove di concetto e validarne le prestazioni è un prototipo denominato DifRob, realizzato da Università di Pisa in collaborazione con ISPESL (contratto 42/98). Ad ISPESL, dirigenti e collaboratori, vanno i ringraziamenti per la disponibilità al mantenimento in uso dello strumento presso il Laboratorio di Ricerca e Sviluppo della Diffrazione a Raggi X dell'Università di Pisa per economicità di progetto.

Un ringraziamento va anche al Centro Diffrattometria del Consorzio Pisa Ricerche, unitamente al Rettore dell'Università di Pisa per aver concesso liberatoria di utilizzo della proprietà intellettuale con dichiarazione n. 17145 del 13.10.2005 e ai cinque Dipartimenti universitari che hanno ispirato la nascita dello spin off accademico XRD-Tools.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] G. Berti, A. Nicoletta, F. De Marco, A. Tonti, G. Augugliaro, D. Pinciroli, "Il metodo XRD per l'osservazione di fenomeni alla scala nanometrica: comportamento a creep e sua propagazione", negli Atti della Conferenza Nazionale *Sicurezza ed Affidabilità delle attrezzature a pressione* SAFAP2008, vol 1, pp. 629-639, Cagliari 2008

[2] G. Berti , A. Nicoletta, G. Augugliaro, F. De Marco, M. Pellizzon, P. Sofia, "Analisi Non Distruttive In Campo Mediante Diffrattometria a Raggi X (XRD)" negli Atti della Conferenza Nazionale *Sicurezza ed Affidabilità delle attrezzature a pressione* SAFAP2006, vol 1, pp. 165-173, Roma. 2006

[3] G. Berti, S. Giubbilini, E. Tognoni: "DISVAR93: A Software package for determining systematic effects in X-ray powder diffractometry,*Powder Diffraction*", Powder Diffraction, vol. 10, n 2, 1995, pp.104-111.

[4] G. Berti: "Detection and modeling of microsto-crystallinity by meands of X-ray powder Diffractometry", in *Advances in X-Ray Analysis*, vol. 38, 1995, pp. 405-412.

[5] EN15305, Non-destructive Testing - Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction, CEN 2008

[6] Analysis of Heat Resistent Steel State by Changes of Lattices Parameters of Carbide Phases, *Material Science*. Vol.14, n.3, 2008, pp 210-2014.

[7] ---- UNI EN 10216-2:2008 Condizioni tecniche di fornitura – Parte 2: Tubi di acciaio non legato e legato per impieghi a temperatura elevata. UNI Gennaio 2008, pp. 1-45

[8] ---- Seamless 9Cr-2W Material, Case 2179-7, *Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, ASME BPV Suppl. 9, 1-2

[9] D. Richardot, J. C. Vaillant, A. Arbab, W. Bendick, "The T92/P92 Book", Vallourec & MannessmannTubes 2000.

[10] G. Berti, F. De Marco: "X-Ray Diffraction for Diagnosis at the Nano-Scale" in Atti del Symposium *Solving Friction and Wear Problems*, Vol 1,Esslingen 2010.

[11] K. Borggreen, P.Huntley,"Some environmental effects on creep testing and extrapolation using minor specimens", negli Atti della Conferenza *High temperature alloys for turbines and other applications*, vol.1 pp.1295-1303, Eds. W.Betz et al. D.Reidel Pub. Comp. 1986.

[12] N.Roy, R.N.Ghosh: "Modelling effects on specimen size and shape on creep of metals and alloys", *Scripta Materialia,* Vol. 36, 1997, pp. 1367-1372.

sessione TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

L'utilizzo della radiografia digitale (DR) nell'ispezione delle attrezzature a pressione.

D. Corò *
**Pragma Scientific S.r.l.*

SOMMARIO

Le verifiche strutturali in situ delle attrezzature a pressione costituiscono sicuramente la miglior garanzia riguardo alla sicurezza delle attrezzature stesse consentendo un diretto controllo dello stato degli impianti. Fra le tecnologie utilizzate per questo genere di verifiche, la radiografia è sicuramente il metodo più efficace per la determinazione quantitativa e qualitativa di difetti strutturali causati da difetti costruttivi o dall'usura provocata dall'attività stessa di tali impianti. La radiografia ha la capacità di fornire una documentazione diretta, verificabile e dimensionale riguardo allo stato reale dell'impianto.

Il limite finora riscontrato nell'utilizzo di questa tecnologia è stato l'impossibilità di ottenere risultati "in line", ossia durante il processo produttivo, causato dai lunghi tempi di attesa per la fase di sviluppo radiografico. Questo limite può oggi essere superato grazie alla radiografia digitale (DR): questa tecnologia permette di ottenere direttamente presso l'impianto, grazie ad un sistema completamente portatile, immagini radiografiche digitali in pochi secondi.

L'utilizzo della radiografia digitale oltre a diminuire drasticamente i tempi di analisi permette di eliminare la necessità di utilizzo di materiali consumabili e di prodotti chimici per lo sviluppo con il conseguente risparmio in termini economici ed un miglioramento della sicurezza dell'operatore consentito anche dall'utilizzo di generatori di raggi x pulsati: di dimensioni e peso ridotti e capaci di far superare le difficoltà di trasporto ed utilizzo delle tradizionali sorgenti radiogene. L'aumento della velocità del processo di verifica consente di determinare con celerità eventuali problematiche nelle attrezzature a pressione aumentando notevolmente il livello di sicurezza degli operatori e di minimizzare la necessità di blocchi del ciclo produttivo.

1. INTRODUZIONE – LA RADIOGRAFIA NELL'ISPEZIONE DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

Elemento fondamentale a garanzia della sicurezza delle attrezzature a pressione è una corretta e scrupolosa ispezione della struttura e dello stato delle stesse in fase costruttiva ed operativa. Difetti quali mancata penetrazione (lack of penetration), difetti strutturali in fase di fusione (lack of fusion, porosity), presenza di scorie, erosione o corrosione delle pareti rappresentano un grande rischio per la normale operatività di suddette attrezzature costituendo un reale pericolo per gli operatori coinvolti. Fra le molte tecnologie oggi a nostra disposizione per il rilevamento di questo tipo di difetti la radiografia è sicuramente quella che garantisce i migliori risultati dal punto di vista sia qualitativo sia quantitativo essendo essa in grado di fornire un risultato obiettivo e dimensionale dell'oggetto analizzato. In molti casi però, la radiografia tradizionale oltre ad essere di difficile applicazione (a causa degli elevati tempi di esposizione nonché dell'impossibile immediatezza dei risultati) rappresenta un elemento di rischio per il personale impiegato nelle ispezioni sul campo, rendendo necessari importanti accorgimenti di protezione personale oltre a lunghi fermi impianto durante lo svolgimento dell'analisi stessa.

La radiografia digitale (DR) fornisce una soluzione ai limiti normalmente imposti dall'utilizzo della tecnologia tradizionale. Consentendo tempi di esposizione estremamente bassi ed un immediato risultato sul campo, questa metodologia di analisi permette di limitare i rischi per gli operatori e di aumentare le possibilità di applicazione della radiografia in questo settore.

2. RADIOGRAFIA DIGITALE (DR) – LA TECNOLOGIA

La radiografia digitale (DR) consiste nell'acquisire direttamente su supporto informatico un'immagine radiografica digitale, eliminando la necessità di utilizzo dei tradizionali supporti quali pellicole, attrezzature e sostanze chimiche necessari per ottenere un'immagine; permette altresì di evitare la scannerizzazione del plate di acquisizione come avviene invece per la radiografia computerizzata (CR). L'immagine risultato dell'ispezione è direttamente disponibile a monitor dopo pochi secondi di esposizione. In figura 1 vediamo la configurazione completa di un sistema di acquisizione radiografica digitale: l'intero sistema (sorgente, pannello, unità di controllo) alimentato a batteria, è controllato da pc tramite cavo di connessione di 50 m o wireless.



Fig. 1 – sistema di acquisizione radiografica digitale (DR)

Questo è reso possibile dalla tecnologia basata sull'utilizzo di un pannello di acquisizione in silicio amorfo (A-si). Il processo di creazione dell'immagine radiografica digitale può essere semplificato in questo modo (vedi fig. 2): i raggi x attraversano l'elemento oggetto di ispezione, la quantità di raggi x non assorbiti dall'elemento stesso arrivano al pannello di acquisizione; uno scintillator trasforma i raggi x in luce per mezzo di un effetto di fluorescenza. Una matrice di fotodiodi in A-si converte la luce in elettroni; ad ogni pixel, che andrà a comporre l'immagine radiografica, viene assegnato un segnale elettrico attraverso dei moduli elettronici che ne minimizzano la componente di rumore (ottenendo un elevato SNR Signal-to-Noise-Ratio). Una scheda elettronica processa quindi il segnale per ciascun pixel fornendo al sistema un'immagine di elevata qualità in cui ad ogni livello del segnale elettrico corrisponde un determinato livello di grigio.

L'immagine così ottenuta avrà un range dinamico a 14 bit (conterrà quindi fino a 16.383 livelli di grigio). Un range dinamico a 14 bit permette di contenere, all'interno di ogni singolo pixel, un numero molto elevato di informazioni (per l'appunto fino a 16.383 differenti livelli di grigio); in Figura 3 è possibile confrontare i livelli di grigio contenuti in un pixel in un sistema a 14 bit ed in uno a 8 bit: la quantità di informazioni all'interno di essi è fino a 64 volte superiore in un sistema a 14 bit.

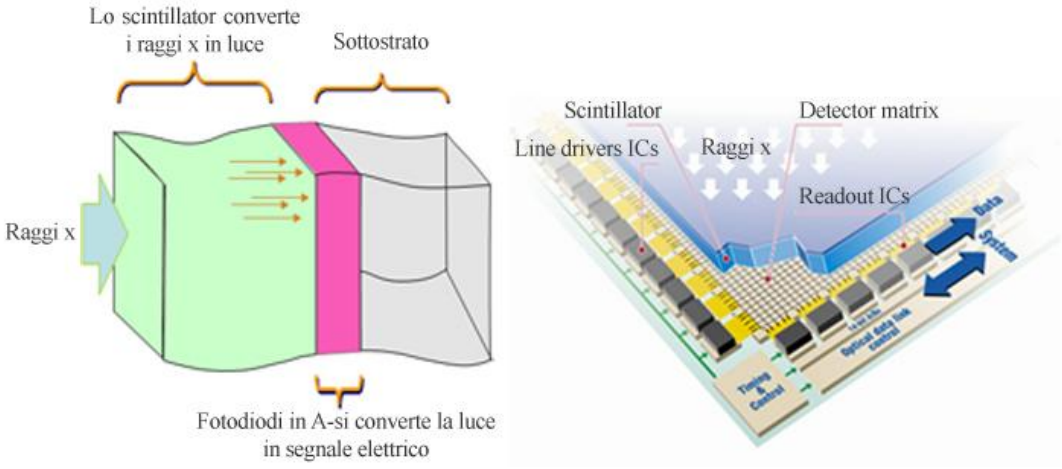


Fig. 2 – Processo di creazione immagine radiografica digitale

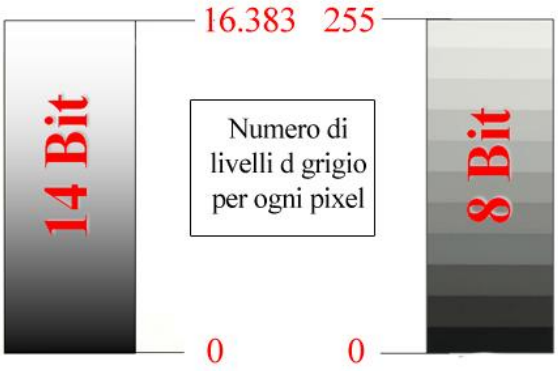


Fig. 3 - Range dinamico e qualità dell'immagine

3. LE APPLICAZIONI

La radiografia digitale è ampiamente utilizzata nelle verifiche su pipe line con ottimi risultati in termini di diminuzione dei tempi di esposizione, qualità dell'immagine ottenuta e quindi della probabilità di rilevamento (POD, probability of detection). In tabella 1 possiamo facilmente notare come i tempi di esposizione nei sistemi di acquisizione radiografica digitale diminuiscano drasticamente; questo è permesso dall'elevatissima sensibilità del pannello di acquisizione.

Come visto in tabella 1, i tempi di esposizione ai raggi x nel caso di utilizzo della radiografia digitale diminuiscono fino a 72 volte rispetto alla tecnologia tradizionale; questo implica non solo un minor tempo di attesa dell'immagine (direttamente disponibile a monitor) bensì anche una minor esposizione del personale alle radiazioni consentendo un sicuro aumento della sicurezza nel luogo dell'ispezione.

La maggior sensibilità del pannello di acquisizione consente inoltre in molti casi di sostituire l'utilizzo di isotopi radioattivi (raggi gamma) con sorgenti radioattive a più bassa energia con evidenti effetti in termini di qualità dell'immagine e di minor dose di radiazioni cui il personale può essere potenzialmente esposto. Il confronto qualitativo fra due immagini ottenute con l'utilizzo rispettivamente di pellicola ed isotopo e sistema di acquisizione digitale e sorgente a raggi x pulsati è presentato in figura 4. Lo studio "Demonstration of Pulsed X-ray machine Radiography as an Alternative to Industry Radiography Cameras, Demonstration Pilot Project"

Oggetto ispezionato	Diametro del tubo	Materiale	Spessore parete	Liquido contenuto	Tempo di esposizione	
					DR	RT
Tubo anti incendio	208 mm	St35 (acciaio)	7.2 mm	Nessuno	30 sec.	3 min.
Profilo in fibra di vetro	700 mm	Fibra di vetro	25 mm	Nessuno	Ca. 0,5 sec.	30 sec.
Tubazioni acqua	150 mm	Ss2343 (acciaio)	6 mm a parete	Acqua	20 sec.	15 min.
Tubi di raffreddamento	250 mm + isolamento	10CrMo (acciaio)	40 mm a parete	Nessuno	50 sec.	Ca. 1 ora
Tubo di vapore a bassa pressione	400 mm + isolamento	St35 (acciaio)	12 mm	Nessuno	30 sec.	Ca. 20 min.
Condutture combustibile	100780 mm	Ss2343 (acciaio)	6 mm	Soda caustica	15 sec.	10 min.

Tab. 1 - Confronto tempi di esposizione radiografia tradizionale (RT) / radiografia digitale (DR)

pubblicato nel 2007 dal Southwest Research Institute (da cui la figura 4), ha dimostrato l'effettiva possibilità di utilizzo di sorgenti radiogene pulsate in combinazione con un sistema di acquisizione radiografica digitale per la diminuzione dei rischi a carico degli operatori radiografici, fermo restando la qualità dei risultati: con l'utilizzo della radiografia tradizionale con una sorgente Ir-192 i tempi di esposizione per l'acquisizione di tre immagini (per la copertura dell'intera saldatura) sono stati di 70 secondi per immagine con un tempo di sviluppo di 20 minuti per un totale di 23,5 minuti; il tempo totale per l'acquisizione di dodici immagini digitali (per coprire l'intera saldatura) è stato invece di 1 minuto e 36 secondi; per quanto riguarda l'area di sicurezza nel primo caso è stata di 20 metri (con una dose di radiazioni pari a 2,5 mr/h, milli Röntgen all'ora), nel secondo invece di soli 3 metri (con una dose di radiazioni pari a 0,02 mr/h). In entrambi i casi tutte i fili dell'IQI sono visibili. La sensibilità del pannello riduce naturalmente l'esposizione (prolungando quindi il ciclo di vita della sorgente) anche nel caso di utilizzo di isotopi radioattivi.

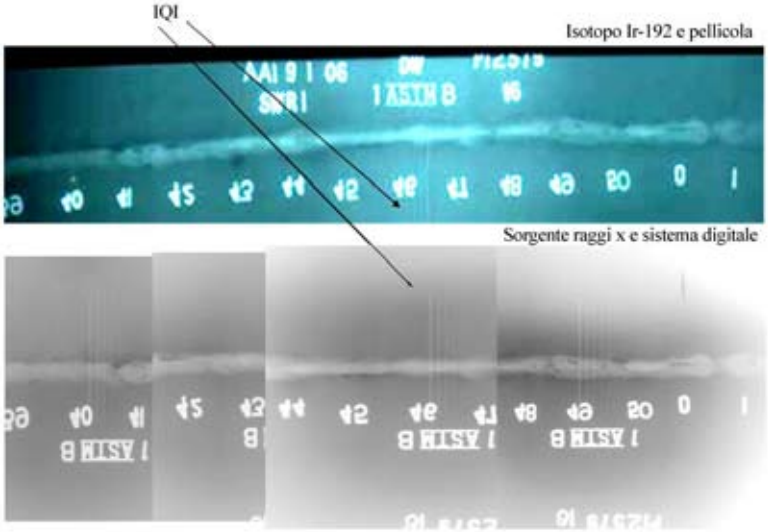


Fig. 4 - Comparazione radiografia digitale con sorgente raggi x e radiografia tradizionale con isotopo Ir-192

In figura 5 e 6 sono presentati due esempi di ispezione effettuati su tubi in acciaio S355: nella prima sono chiaramente visibili difetti quali porosità, mancanza di fusione e presenza di scorie nella parete della tubazione; è possibile inoltre vedere chiaramente il filo n. 15 dell'indice di qualità dell'immagine (n.b. la qualità dell'immagine visualizzata nel software di acquisizione è significativamente più alta rispetto all'immagine qui riportata, numerosi strumenti consentono di aumentare ulteriormente le informazioni contenute in essa).

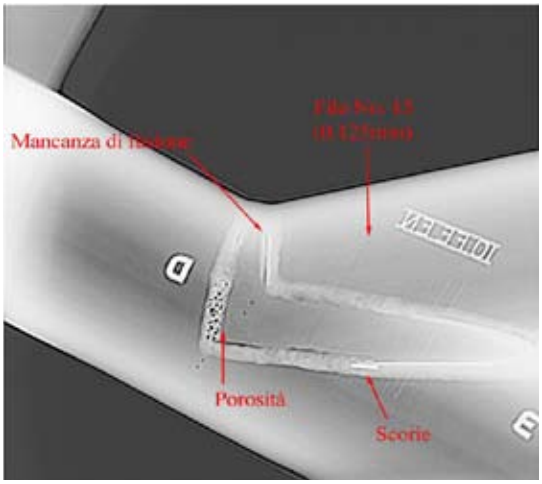


Fig. 5 – Ispezione su tubo in acciaio S355

Lo strumento "rilievo" (emboss) del software di acquisizione permette di mettere in evidenza i difetti presenti nell'oggetto dell'ispezione: risulta chiaro dal confronto presentato in figura 15 come questa funzione consenta di enfatizzare la presenza di scorie e di erosione all'interno della tubazione.

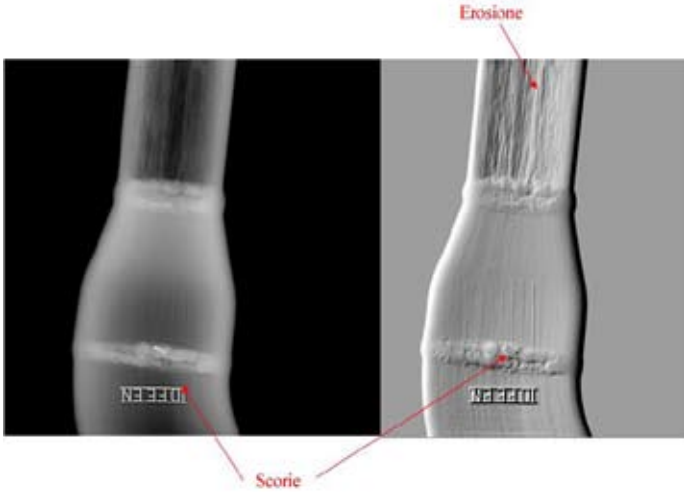


Fig. 6 – Ispezione su tubi in acciaio S355; lo strumento "rilievo" permette di mettere in risalto la presenza di scorie ed erosione nell'oggetto dell'ispezione.

La radiografia digitale rende possibile l'utilizzo di svariati altri strumenti utili nelle indagini su attrezzature. La radiografia tradizionale permette di effettuare indagini su pipe line in presenza di isolamento senza dover rimuove l'isolamento stesso (altre tecnologie, quali ad esempio gli

ultrasuoni necessitano del contatto con la struttura della tubazione). La possibilità, introdotta dalla tecnologia digitale, di effettuare una sola immagine a differenti livelli di energia unitamente ad un algoritmo di calcolo automatico dello spessore delle pareti, consente non solo di sfruttare i vantaggi derivanti dalla radiografia (indagini in tubazioni isolate), ma anche di mettere in evidenza lo spessore delle pareti ed in pochi secondi di ottenere una misurazione in automatico. In figura 7 possiamo notare come un'immagine ottenuta con due livelli di energia consenta di distinguere chiaramente i confini delle pareti e l'utilizzo dello strumento "line profile" permetta di ottenere precise informazioni quantitative sullo stato delle stesse.

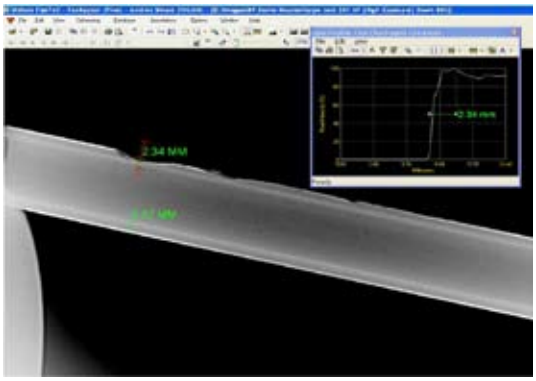


Fig. 7 – Strumenti di visualizzazione "wall thickness" e "line profile" per misurazioni automatiche.

Altro strumento di fondamentale importanza nella radiografia digitale è la possibilità di migliorare la qualità dell'immagine ottenendo, attraverso un processo di "avaraging" di più immagini, un più alto SNR (Signal to Noise Ratio), aumentando quindi la qualità del segnale e diminuendo la componente di rumore nel segnale stesso. In figura 8 possiamo vedere un esempio di utilizzo dello strumento "avaraging" contenuto nel software di acquisizione. L'aumento della qualità dell'immagine aiuto l'identificazione della cricca presente nella tubazione.

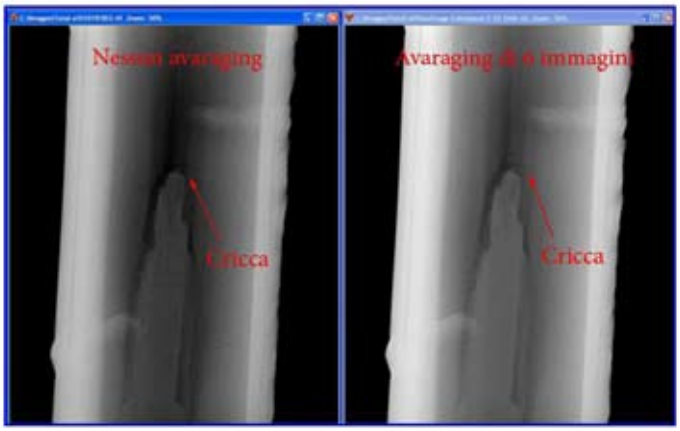


Fig. 8 – Maggior qualità d'immagine con l'utilizzo dello strumento "avaraging".

4 – CONCLUSIONI

In conclusione la radiografia digitale (DR) oltre a rappresentare una tecnologia innovativa nel campo delle prove non distruttive ed una valida alternativa alla radiografia tradizionale (RT) ed alla radiografia computerizzata (CR) apporta una serie di vantaggi nelle ispezioni sulle at-

trezzature a pressione che possono essere così rielencati:

- Elevata qualità d'immagine con il relativo aumento della probabilità di rilevamento (POD).
- Completa portabilità del sistema per un perfetto utilizzo in situ: consentita anche dall'alimentazione a batteria dell'intero sistema.
- Velocità di set up del sistema e risultati immediati; nessun tempo di sviluppo (RT) o di scannerizzazione del supporto di acquisizione (CR).
- Maggiore sensibilità del supporto di acquisizione con relativa riduzione di energia necessaria (riduzione dei KV) e minori tempi di esposizione. Con effetti positivi per quanto riguarda la sicurezza del personale, la durata del fermo impianto e l'area di sicurezza da rispettare durante l'indagine.
- Utilizzo di strumenti di analisi resi possibili unicamente dalla tecnologia digitale con un netto miglioramento dei risultati in termini di efficacia ed efficienza di indagine.

BIBLIOGRAFIA:

[1] Lior Pick; Ofra Kleinberger: "Going digital: Technical Highlights of Digital Radiography for NDT", *Materials evaluation*. vol. 67, n° 10, 2009, pp. 1111-1116

[2] Ron Pincu: "Digital Radiography and its Advantages in Field NDT Inspections Today" 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 ottobre 2008, Shanghai, Cina

[2] Glen Light, PhD; Sally Hamlin, PhD: "Demonstration of Pulsed X-ray Machine Radiography as an Alternative to Industry Radiography Cameras", Southwest Research Institute e Environmental Protection Agency (EPA USA), novembre 2006.

Rilevamento di fenomeni corrosivi su acciaio P01 con il metodo di Emissione Acustica

*G. Gusmano** - G. Montesperelli***
D. Lazzaro - C. Mennuti**
*P. Travaglia****

** ISPESL, Laboratorio Controlli NonDistruttivi, Dipartimento Tecnologie di Sicurezza,*
*** Università di Roma "Tor Vergata", Dip. di Scienze e tecnologie chimiche/INSTM*
**** The University of Sheffield, Engineering Materials Dep.*

ABSTRACT

Uno dei meccanismi di danneggiamento più frequenti nei serbatoi per GPL, se non il più frequente è la corrosione. Il laboratorio CND ha incluso nella procedura di riqualificazione tramite emissione acustica (EA) un parametro di valutazione dello stato corrosivo basato essenzialmente sulla misura del *rate* di attività acustica e sulla relativa misura RMS, indicatori sicuramente efficaci per una analisi quantitativa.

È tuttavia evidente che uno studio più specifico della progressione del fenomeno corrosivo e la sua caratterizzazione implica un approfondimento interpretativo dei segnali di emissione acustica Ciò ha indotto l'avvio di una ricerca finalizzata alla misura in parallelo dell'EA e del rumore elettrochimico (ENA), per generare una banca dati utile all'interpretazione delle misure EA riconducibili alla caratterizzazione di tali fenomeni corrosivi.

L'analisi condotta indica che i segnali EA rilevati su provini in un intervallo temporale piuttosto ristretto, mostrano una buona corrispondenza con i segnali di rumore elettrochimico, sulla base di fenomeni fisici di rottura del film passivo. Non è escluso uno sviluppo dell'attività per la messa a punto di un ulteriore indicatore sintetico della procedura EA dedicato alla caratterizzazione del fenomeno corrosivo.

1 INTRODUZIONE

Nel 1994 é stata approvata la possibilità d'utilizzare serbatoi interrati di GPL per uso domestico. Tale soluzione non permette l'impiego delle tecniche tipicamente impiegate per i serbatoi aerei. Per tale ragione, sono state introdotte modalità di verifica basate su approcci diagnostici innovativi che, compatibilmente al mantenimento dell'efficacia del controllo per l'esercizio in sicurezza del serbatoio, non creassero un impatto significativo per l'utenza. Sulla base di questa premessa. il laboratorio Controlli Non Distruttivi dell'ISPESL ha introdotto una procedura di riqualificazione dei piccoli serbatoi per GPL interrati mediante una tecnica basata sul metodo di Controllo Non Distruttivo di Emissione Acustica. La accettabilità per la proroga all'esercizio in sicurezza dell'impianto è condizionata alla misura di un parametro sintetico, messo a punto sulla base di oltre 50000 prove effettuate. Si sottolinea che uno dei meccanismi di danneggiamento più frequenti è quello della corrosione sulla membratura dei serbatoi, causato essenzialmente da infiltrazioni di acqua nel guscio in polietilene realizzato a protezione dal contatto diretto con il terreno. Per questo, nello sviluppo della procedura fu introdotto un parametro di valutazione dello stato corrosivo basato essenzialmente sulla misura del *rate* di attività EA e sulla relativa misura RMS, indicatori sicuramente efficaci per una analisi quantitativa.

È tuttavia evidente che uno studio più specifico della progressione del fenomeno corrosivo

e la sua caratterizzazione implica un approfondimento interpretativo dei segnali EA. Ciò ha indotto l'avvio di una ricerca finalizzata alla misura in parallelo di *burst* EA e rumore elettrochimico (ENA), per generare una banca dati utile all'interpretazione delle misure EA riconducibili alla caratterizzazione di fenomeni corrosivi. Le condizioni di prova, scelte in modo da trovare un compromesso tra l'esigenza di avere risposte attendibili in tempi brevi e quella di risultare il più possibile affini a quelle in campo sono state: ambiente, soluzione acquosa al 3% di NaCl, soglia EA di 35 dB. La soglia EA è stata fissata ad un valore piuttosto elevato per evitare l'introduzione incontrollata di *noise* esterno.

1.1 Rumore elettrochimico

Con il generico termine di *rumore* si indicano le fluttuazioni nel tempo di una qualsiasi variabile fisica. Nei sistemi in libera corrosione le grandezze fisiche che di solito vengono analizzate sono la corrente e la tensione [1]. La stretta relazione tra rumore elettrochimico e processi corrosivi messa in luce da Iverson [2] ha portato ad una intensa sperimentazione del metodo. I segnali di *noise* hanno un intervallo di potenziale variabile tra 10^{-6} e 10^{-1} V e uno di corrente, variabile tra 10^{-11} e 10^{-3} A [3-5].

Da un'analisi nel dominio nel tempo si possono ottenere delle prime valutazioni mediante un'analisi visiva del segnale cioè l'osservazione del tracciato del segnale può spesso aiutare a riconoscere un determinato tipo di corrosione. Nel caso di corrosione localizzata, Bertocci e Huet [1, 6] hanno osservato, nella fase iniziale di rottura del film passivo e successiva ricomposizione dello stesso, dei picchi di tensione e corrente aventi segni opposti. Hladky e Dawson hanno ottenuto due tracciati di segnale diversi per il *pitting* (picchi nella stessa direzione) e per la corrosione interstiziale (picchi in direzioni opposte) proprio a conferma della capacità del *noise* di discriminare i diversi tipi di attacco [4]. Oltre a questa prima analisi qualitativa, il segnale è di norma analizzato tramite parametri statistici quali la deviazione standard ed i valori medi del rumore. La deviazione standard di corrente si è rivelata utile nel segnalare l'innesco della corrosione interstiziale nelle esperienze di Simeos e Ferreira [7].

1.2 Emissione acustica

L'emissione acustica è un metodo di prona non distruttivo, basato sull'acquisizione dei segnali ultrasonori, di solito di frequenza compresa tra i 50 kHz ed 1 MHz, emessi da un materiale sotto sforzo per effetto di fenomeni irreversibili (danneggiamento, prodotto da cause puramente meccaniche, dall'interazione metallo-ambiente o da una combinazione sinergica dei due meccanismi) che si verificano durante la prova. Il metodo basato sul rilevamento dell'emissione acustica (EA) ha una caratteristica che lo distingue dagli altri: è un metodo passivo che può rilevare la evoluzione di una discontinuità, ma non la caratterizza per tipo e geometria. Per essere tale, l'emissione acustica deve differenziarsi dal rumore di fondo in quanto il segale associato deve superare una soglia definita dall'operatore (di solito tra i 30,6 ed i 40 dB, un compromesso tra rumore di fondo e sensibilità della misura). Altri parametri importanti definiti dall'operatore sono il "*rearm time*" ed il "*duration discrimination time*". Il primo è il periodo di non acquisizione, definito come il tempo in cui l'acquisizione è sospesa per evitare di considerare echi dell'evento precedente, il secondo definisce l'intervallo di tempo dopo l'ultimo passaggio di soglia per discriminare un *hit* da quello successivo.

Per quanto riguarda la localizzazione, le tecniche basate sulla misura del tempo di volo sono le più efficaci. Non è possibile conoscere l'esatto tempo in cui si è manifestato l'evento EA ma è possibile ricavare le differenze nei tempi d'arrivo dell'onda ad esso relativo ai sensori che costituiscono l'*array* (Δt_{ij}) di acquisizione. La localizzazione utilizza semplici algoritmi di triangolazione basati su approcci elementari di geometria analitica. Il prodotto tra la differenza dei tempi d'arrivo (Δt_{ij}) per la velocità del suono nel mezzo consente di ricavare la differenza delle distanze della sorgente EA dai vari sensori dell'*array.*

1.3 L'uso dell'EA nello studio della corrosione

È necessario precisare che in tutti i casi presentati in letteratura il pH della soluzione di prova è molto acido. In questo caso il processo di riduzione catodico degli ioni H^+ può risultare prevalente su quello di riduzione dell'O_2. Fregonese et al [8,9] suggeriscono che, in presenza di

un fenomeno corrosivo, il meccanismo rilevato con EA corrisponda allo sviluppo di idrogeno. Questi autori riportano come sia possibile rilevare, dall'analisi dei parametri EA, il passaggio da una condizione di corrosione localizzata come il *pitting* a corrosione generalizzata, ed hanno evidenziato l'esistenza di un ritardo tra innesco del *pitting* ed il suo rilevamento tramite EA. In [8, 9] è stata studiata la corrosione di un acciaio inossidabile AISI 316L per *pitting* ottenuto tramite polarizzazione potensiostatica in una soluzione al 3% di NaCl a pH 2. I parametri d'acquisizione dell'EA non sono definiti. Gli autori dividono i segnali tra risonanti ed impulsivi, attribuendo i primi al pitting ed i secondi alla corrosione generalizzata. Il ritardo riscontrato tra l'innesco del pitting ed il momento in cui il fenomeno è rilevato dal segnale di EA è ricondotto ai diversi meccanismi interessati, dando particolare rilevanza allo sviluppo di idrogeno. In un successivo articolo lo stesso gruppo di ricerca ha studiato la possibilità di rilevare tramite EA la corrosione interstiziale indotta su acciai AISI 304L aggiungendo H_2O_2 alla soluzione di prova di NaCl, portando il pH a 2 con aggiunta di HCl [10]. In questo caso i parametri EA sono resi noti ed è importante notare che la soglia è stata fissata a 21 dB. Anche in questo caso le conclusioni a cui sono giunti gli autori sono simili alle precedenti, ciò che viene rilevato dall'EA è la formazione delle bolle di idrogeno. Darowicki et al [11], usano un *set-up* di misura simile, ma con soglia a 28 dB, per studiare acciaio AISI 304L passivato con 20% HNO_3 a 60°C per 30', in ambiente di NaCl 3% portato a pH 2. Gli autori pur affermando che l'EA rileva la formazione di bolle d'idrogeno e che essa è in anticipo sulla formazione dei *pit*, arrivano alla conclusione che il metodo non è efficace per rilevare il *pitting* su acciai austenitici. Un altro studio di corrosione in ambiente acido (pH da 1 a 4) [12] ha portato gli autori alle stesse conclusioni: l'EA rileva la formazione di bolle d'idrogeno. Magaino et al [13] affermano al contrario che l'EA è causata da un cambiamento istantaneo della condizione di *stress* della superficie del materiale, per esempio dovuta alla rottura di un film di passivazione, lo stesso meccanismo è suggerito in un articolo che si occupa di *stress corrosion cracking* [14]. Jomdecha et all [16] hanno studiato la possibilità di identificare diversi tipi di corrosione attraverso l'EA (generalizzata, *pitting, crevice e stress corrosion cracking*) in particolare attraverso i parametri classici dell'EA, la *threshold* in questo caso è posto a 45 dB, ed i pH delle soluzioni variano da 1 a 2.

2 MATERIALI E METODI

La necessità di svolgere contemporaneamente misure di rumore elettrochimico e di emissione acustica ha imposto il tipo di configurazione adottato in questo studio. Il rumore elettrochimico richiede la presenza di un elettrodo e di un contro-elettrodo, il rilevamento dei segnali EA richiede che i sensori siano fissati fermamente in contatto con la parte che dovrà corrodersi e non a contatto con la soluzione di prova. Per soddisfare contemporaneamente queste condizioni si e' fatto uso di una cella di misura costituita da un cilindro di vetro ($Ø_{int}$ 40 mm, $Ø_{est}$ 45 mm) incollato al centro dell'elettrodo di misura (200X50 mm^2) posto orizzontalmente, mentre il contro elettrodo (100 x 10 mm^2) veniva immerso verticalmente nella soluzione di prova. Entrambi gli elettrodi erano in acciaio P01. Un elettrodo di *reference* è stato usato per misurare il *noise* di potenziale.

I dati relativi al rumore elettrochimico sono stati acquisiti mediante un potenziostato Solartron 1287. Il rumore elettrochimico è stato misurato con un *sample rate* di 1 punto al secondo per complessivi 1024 punti per ciascuna acquisizione (durata complessiva 1024 secondi), e successiva pausa di 180 secondi con l'acquisizione successiva. I parametri dell'emissione acustica considerati significativi sono stati: soglia a 35 dB, come compromesso tra l'esigenza di acquisire i deboli segnali generati dalla corrosione ma più sensibile ai rumori dell'ambiente di prova, "*rearm time*" 300 ms e "*duration discrimination time*" di 400 ms, standard per provini in acciaio. I segnali sono stati rilevati mediante due sensori Vallen VS-150RIC disposti a circa 1 mm dal bordo in silicone e registrati usando un sistema Vallen AMYS-5. Dopo alcune prove preliminari è stato fissato un terzo sensore su di un elettrodo montato accanto a quello in prova con funzione di guardia, per scartare i segnali dovuti a rumori ambientali.

In tutte le prove è stata impiegata una soluzione al 3% in peso di NaCl. Le condizioni di prova si discostano da quanto trovato in letteratura per i seguenti aspetti: il *pitting* non è indotto da un potenziale fissato ed imposto al sistema, il pH è neutro invece che acido. Alcuni provini sono stati precedentemente passivati con una soluzione 0,5 molare di Na_3PO_4 per 6 ore prima della

aggiunta di una soluzione concentrata di NaCl dosata in modo da ottenere una concentrazione finale in NaCl del 3% in peso.

3. RISULTATI E DISCUSSIONI

Il numero di *hit* rilevati varia da un minimo di 18 ad un massimo di 46934. Questa grande variazione è da attribuire principalmente alla conformazione dell'elettrodo e contro-elettrodo e dai trattamenti a cui è stato sottoposto il provino (i provini passivati emettono meno). La Tab. 1 elenca i dati relativi a tutti i provini analizzati.

Analizzando le prove svolte è spesso possibile identificare e catalogare un "*pattern*" nell'andamento dei segnali cumulati e perciò nell'energia emessa, definito "tipo 1", che si caratterizza per un incremento molto rapido (discontinuo) nel numero di *hit* rilevati in funzione del tempo (Fig. 1a). Tutte le altre modalità d'incremento degli *hit* sono state classificate come "tipo 2" (Fig. 1b). La Fig. 1 evidenzia tali due diverse modalità:

1. provini con incremento "a scatto" n°: 7; 10, 11, 13,16, 17, 18, 20, 21, 28, 29;
2. provini con altri tipi d'incremento n°: 8, 9, 12, 14, 19, 23, 30;

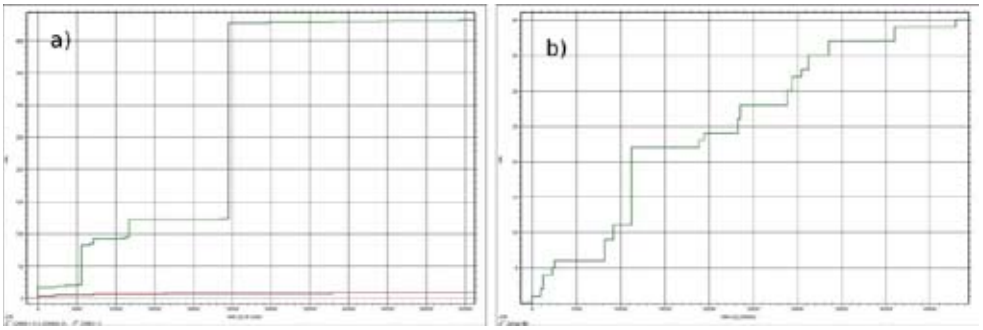


Fig. 1 - Andamento degli hit cumulati in funzione del tempo, a) a scatto, provino n°13; b) piccoli gradini, provino n°8.

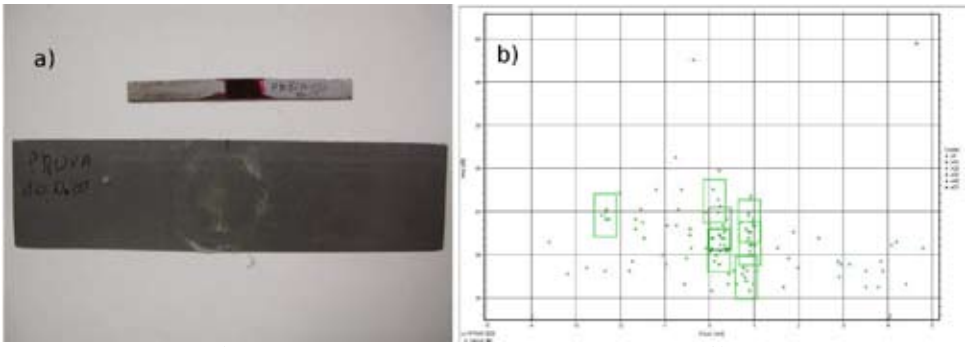
Per quanto riguarda l'ampiezza dei segnali EA si è scelto di analizzare la mediana della media, meno influenzata da valori estremi, come per esempio rumori esterni, (Tabella 1). Sono stati registrati segnali fino ad un massimo di 77,2 dB probabilmente attribuibili a rumore esterno. È stata riscontrata un'ottima ripetibilità tra tutti i provini misurati, una media delle mediane delle ampiezze è di 38 dB ±1.13 per i segnali non filtrati. Il numero di *count* è risultato molto basso e la media delle mediane dei *count* a 2,44. Questi due dati considerati insieme mostrano che la soglia di 35 dB assunta per le prove si è rivelata piuttosto alta (crf. 21 e 28 dB in [10, 11]), ma si è preferito mantenerla su tali in considerazione dell'obiettivo della ricerca come più affini alle modalità applicative per prove di riqualificazione dei serbatoi interrati. Lo studio dell'onda elastica registrata non ha messo in evidenza una forma caratteristica dei segnali impulsivi (*burst*) dovuti a rilasci di energia causati da deformazioni o danneggiamenti meccanici, quanto invece forma assimilabile a segnali di tipo continuo caratteristici del fenomeno corrosivo, in pieno accordo con le indicazioni di letteratura. A causa della bassa ampiezza dei segnali rilevati è stato possibile correlare nel tempo i due segnali EA ed ENA solo in alcuni casi, permettendo la localizzazione degli eventi ed il confronto con le zone in cui è avvenuta la corrosione. Nella maggior parte dei casi è stato possibile trovare una relazione tra *noise* elettrochimico ed EA. Alcune delle cause che non hanno permesso la correlazione sono:

- elevata sensibilità della misura di *noise* in confronto alla misura di emissione acustica nella prima parte della prova (*pitting*),
- migliore sensibilità della misura di EA nel rilevare corrosione generalizzata nella seconda parte della prova.

Rispetto a quanto indicato da Jomdecha et al. [15], le ampiezze degli eventi risultano molto minori. Analizzando i *count* cumulati riportati nell'articolo, piuttosto che gli *hit* (non disponibili in una forma confrontabile), si trova un andamento in funzione del tempo sostanzialmente riferibile al tipo 1.

La correlazione tra segnali di EA i di *noise* elettrochimico è illustrata dai dati rilevati nelle prove di seguito riportati.

3.1. Provino 10, non passivato



a) b)

Fig. 2 – a) provino 10;
b) localizzazione degli eventi EA. I segnali EA corrispondono alla corrosione nella parte centrale

Gli eventi EA localizzati ed aggregati in *cluster* in Fig. 1b hanno manifestato un andamento cumulativo degli *hit* di sicuro tipo 1 (cioè con incrementi repentini). Tali *cluster* corrispondono ad aree di *pitting* localizzate con evidenza in Fig 2a (il provino ha subito un processo di decapaggio per rimuovere i prodotti di corrosione, prima della foto). Nello specifico è stata riscontrata una eccellente corrispondenza. L'analisi della deviazione standard della corrente di *noise* ha identificato una elevata attività corrosiva durante tutta la durata della prova (Fig 3). Per altro si è registrato un incremento di più di 250 *hit* in circa 1500 secondi, seguito da incrementi minori per un totale di *hit* rilevati maggiore di 750. Gli *hit* rilevati si sono per la gran parte manifestati nei primi 20000 secondi.

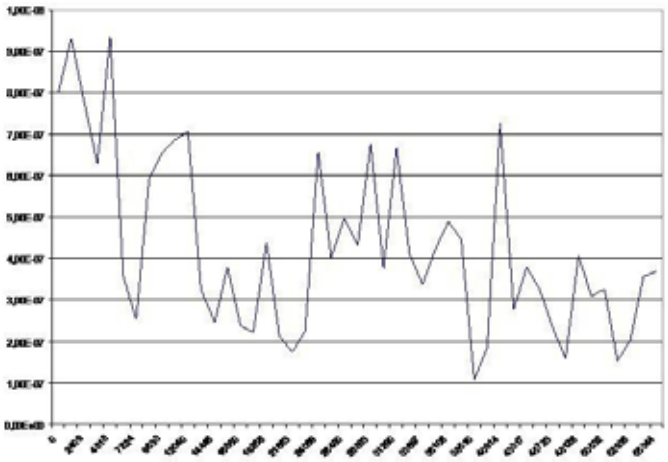


Fig. 3 - Deviazione standard della corrente di noise.

Osservando l'andamento della corrente e del potenziale di *noise* si riscontra una buona correlazione tra l'attività EA (intesa come rilevazione differenziale di *hit* EA nel tempo) e *noise* elettrochimico per i primi 7000 secondi, come evidenzia la Fig. 4. Dopo 10000 secondi la corrispondenza risulta meno esatta. Il tipo di corrosione sembra essere evoluta in corrosione generalizzata, e la correlazione si perde. va comunque sottolineato che sono stati registrati segnali di EA che non hanno trovato conferma nelle misure ENA, circa 15000, 17000 e 19000 secondi, Fig. 5.

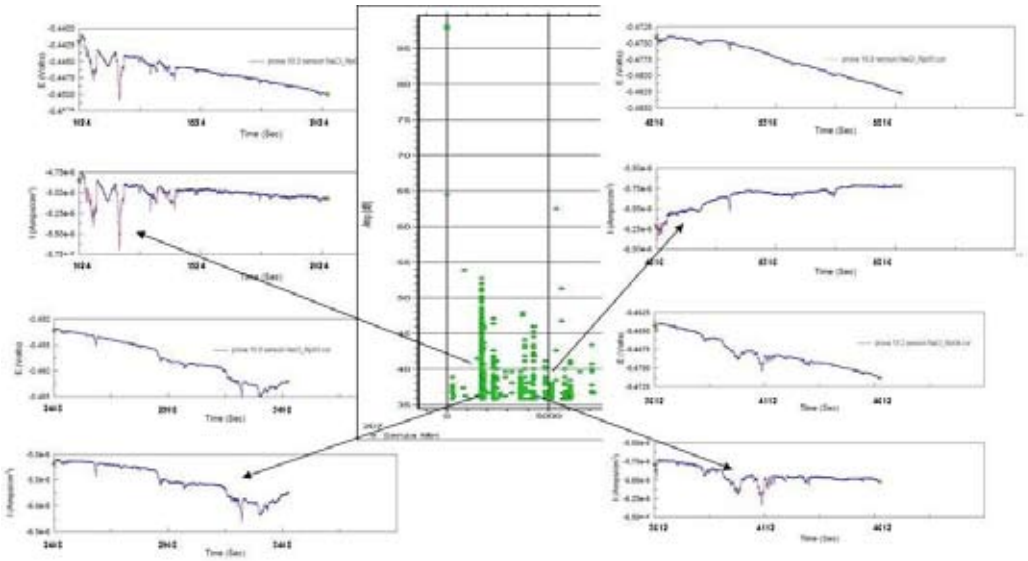


Fig.4 - Correlazione tra ENA ed hit EA in funzione del tempo rilevati tra 1024 e 5816 secondi.

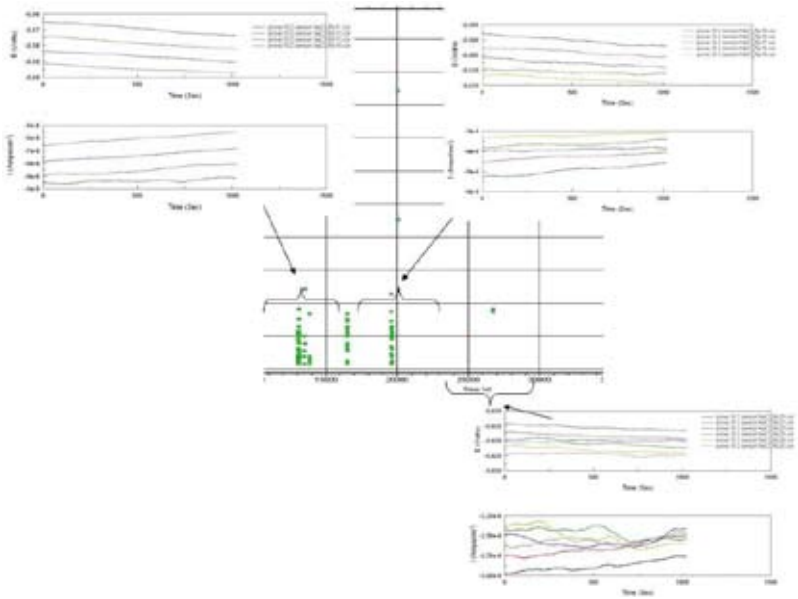


Fig. 5 - Correlazione tra ENA e hit EA in funzione del tempo rilevati tra 12040 e 29920secondi.

3.2. Provino 14, Passivato



Fig. 6 - Provino 14 passivato ed ingrandimento al microscopio ottico.

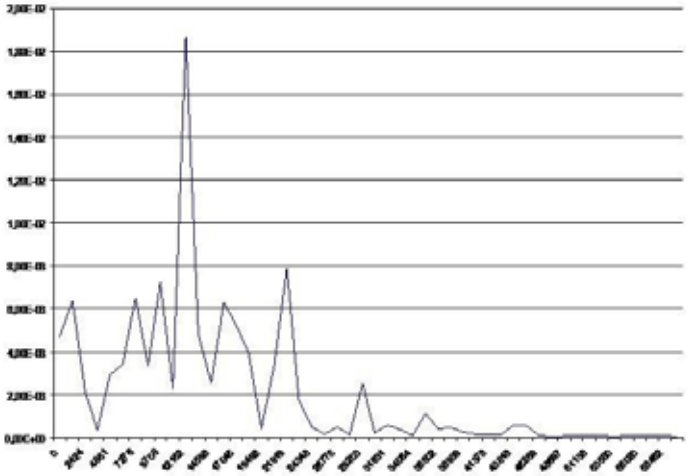


Fig. 7 - Deviazione standard della corrente di noise.

I provini 12, 14 e 16 sono stati passivati come descritto nella sezione "Materiali e metodi". In tal modo è stata favorita corrosione interstiziale anziché *pitting*, come si evince dall'immagine di Fig. 6. Queste prove hanno prodotto alcuni segnali di *noise* ben definiti e di grande energia. Dall'analisi della deviazione standard della corrente di *noise* (Fig. 7) si evidenzia che i primi 24500 secondi sono quelli in cui si manifesta gran parte della corrosione.

Analizzando i segnali rilevati dall'emissione acustica, *hits* in funzione del tempo (Fig, 8),si può rilevare che, con esclusione dei primi 100 secondi (certamente rumore esterno come verificato dal sensore di guardia, punti rossi), si ha attività significativa solo dopo i 21000 secondi, fino a circa 29000. L'analisi della corrente e del potenziale di *noise* rileva una sostanziale attività tra 10872 e 15000 secondi, non rilevata dall'emissione acustica. I segnali rilevati dall'emissione acustica tra 21000 e 30000 secondi non sono riscontrati da segnali di *noise* (Fig. 9). Nel caso di *crevice corrosion*, non è stato possibile ottenere misure di EA che corrispondessero a quanto registrato dalla ENA.

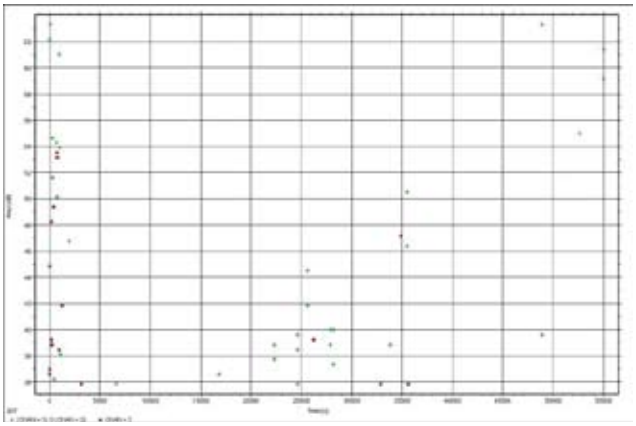


Fig. 8 - Hit cumulati in funzione del tempo non filtrati (punti verdi). Il canale 3 è usato come guardia (punti rossi)

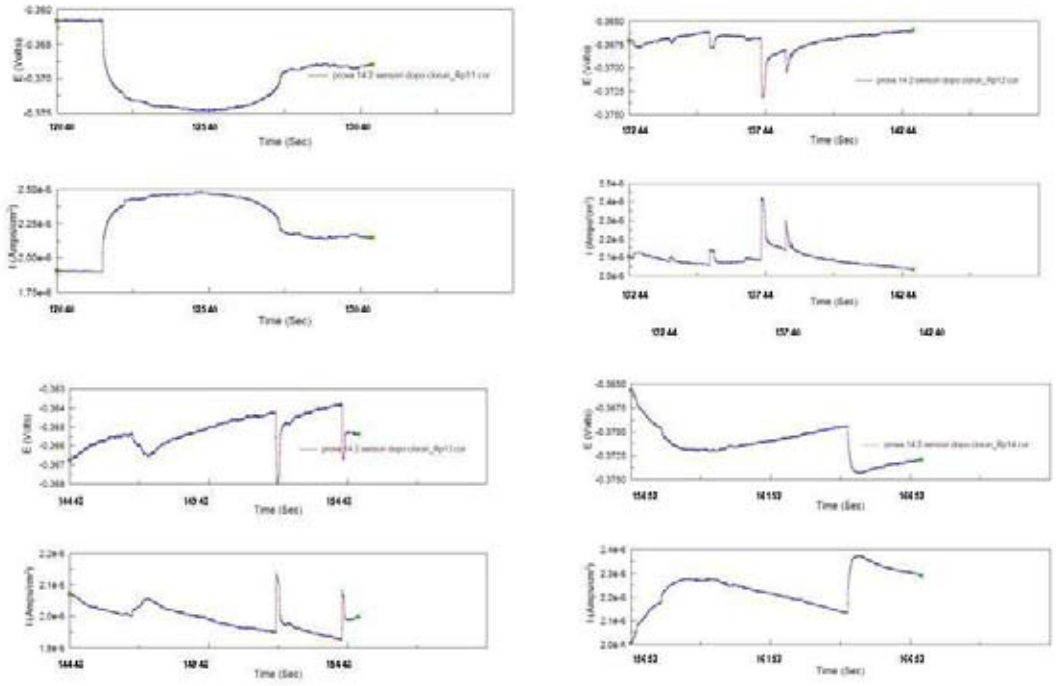


Fig. 9 - Andamento della corrente e del potenziale di noise da 12040 a 16676 secondi

4 CONCLUSIONI

Come è possibile osservare dai due esempi presentati, i segnali EA dovuti a fenomeni corrosivi, vengono rilevati contemporaneamente ai segnali di *noise*. Ciò è in disaccordo con quanto indicato in [9, 10] in cui i segnali di EA sono in ritardo rispetto alla formazione dei *pit*. Il meccanismo di formazione dei segnali d'emissione acustica è diverso. Se nel caso degli articoli citati l'EA è attribuita alla formazione di bolle d'idrogeno [16], nel nostro caso si può ricondurre ad

un rilascio d'energia elastica dovuto alla rottura del film passivo come suggerito da Magaino et al [13] e Andreykiv et al [14]. Il differente peso dei due meccanismi è dovuto alle diverse condizioni di prova: nel caso specifico pH 7, per gli autori citati pH 2. La maggiore presenza di idrogenioni permette la formazione di un numero elevato di bolle di idrogeno e di dimensioni maggiori, rendendo il meccanismo di EA prevalente. L'andamento nel tempo degli *hit* cumulati di tipo 1 concorda con quanto ottenuto in [15] nel caso di *pitting*, benché il numero di *count* e le ampiezze dei segnali rilevati siano molto inferiori a causa del pH usato.

Lo scopo di queste prove, cioè la possibilità di analizzare lo stato di corrosione dei serbatoi interrati durante le prove di riqualificazione, ha imposto la configurazione di alcuni parametri del *setup* strumentale EA, il più importante dei quali si è dimostrata la soglia di acquisizione, al di sotto della quale i segnali vengono considerati rumore di fondo. Tale soglia è stata impostata a 35 dB (40 dB per le prove di riqualificazione) e ha permesso di rilevare un buon numero di segnali nella maggior parte delle prove svolte. Tuttavia si è confermata una grande variabilità nel corso dei test: *hit* rilevati da un minimo di 16 ad un massimo di 45022, ed un numero di *count* per *hit* estremamente basso (mediamente 2,44), specialmente nel caso della corrosione, ad indicare che comunque la soglia è stata impostata ad un valore relativamente alto per discriminare fenomeni di corrosione.

La ricerca ha mostrato che è possibile rilevare *pitting* usando l'EA. Dai segnali rilevati si può concludere che nel caso specifico della configurazione in esame è possibile rilevare corrosione tramite EA, e nella maggior parte dei casi correlarla con il *noise* elettrochimico. La maggior parte dei provini ha mostrato un andamento di tipo 1 probabilmente causato dall'ambiente utilizzato. Anche i provini che non hanno mostrato un andamento cumulativo degli *hit* assimilabile al tipo 1 hanno comunque evidenziato incrementi discreti (a scatti) anche di gran lunga meno severi. È possibile immaginare che la causa di questo andamento è nel rilascio di energia dovuto alla rottura del film passivante. A causa della elevata dispersione dei dati rilevati e la specificità delle prove svolte, la definizione di un indicatore sintetico per la valutazione dello stato corrosivo non è stata possibile. La possibilità di misurare e localizzare tramite tecniche non invasive vari livelli di corrosione in serbatoi interrati durante le prove di riqualificazione, con relativo abbattimento dei costi, più che giustifica ulteriori studi, decisamente facilitati dall'esperienza acquisita.

5 BIBLIOGRAFIA

[1] Bertocci, U. and F. Huet, *Noise analysis applied to electrochemical systems*. Corrosion, 1995. 51(2): p. 131-44.

[2] Iverson, W.P., *Transient Voltage Changes Produced in Corroding Metals and Alloys*. Journal of the Electrochemical Society, 1968. 115(6): p. 617-618.

[3] Legat, A. and V. Dolecek, *Corrosion monitoring system based on measurement and analysis of electrochemical noise*. Corrosion, 1995. 51(4): p. 295-300.

[4] Hladky, K. and J.L. Dawson, *The measurement of localized corrosion using electrochemical noise. Corrosion Science*, 1981. 21(4): p. 317-22.

[5] Trasatti, S., *La misura del rumore elettrochimico come tecnica di monitoraggio della corrosione negli impianti industriali*. C&I, 1995. 77: p. 435.

[6] Bertocci, U., et al., *Noise resistance applied to corrosion measurements. I. Theoretical analysis*. Journal of the Electrochemical Society, 1997. 144(1): p. 31-7.

[7] Simeos, A.M.P. and M.G.S. Ferreira, *Crevice corrosion studies on stainless steel using electrochemical noise measurements*. Brasilian corrosion journal, 1987. 22(1): p. 21-24.

[8] Fregonese, M., et al., *Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels: Monitoring by acoustic emission*. Corrosion Science, 2001. 43(4): p. 627-641.

[9] Fregonese, M., et al., *Monitoring pitting corrosion of AISI 316L austenitic stainless steel by acoustic emission technique: choice of representative acoustic parameters*. Journal of Materials Science, 2001. 36(3): p. 557-63.

[10] Kim, Y.P., et al., *Ability of acoustic emission technique for detection and monitoring of cre-*

vice corrosion on 304L austenitic stainless steel. NDT and E International, 2003. 36(8): p. 553-562.

[11] Darowicki, K., A. Mirakowski, and S. Krakowiak, *Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods*. Corrosion Science, 2003. 45(8): p. 1747-56.

[12] Kasai, N., et al., *Correlation between corrosion rate and AE signal in an acidic environment for mild steel*. Corrosion Science, 2009. 51(8): p. 1679-1684.

[13] Magaino, S., et al., *Spectrum analysis of corrosion potential fluctuations for localized corrosion of type 304 stainless steel*. Journal of the Electrochemical Society, 1987. 134(12): p. 2993-7.

[14] Andreykiv, O.Y., M.V. Lysak, and V.R. Skalsky, *Method of accelerated evaluation of K1scc under stress corrosion cracking*. Engineering Fracture Mechanics, 1996. 54(3): p. 387-94.

[15] Jomdecha, C., A. Prateepasen, and P. Kaewtrakulpong, *Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types*. NDT and E International, 2007. 40(8): p. 584-593.

[16] Seah, K.H.W., et al., *Correlation of acoustic emission with rate of corrosion*. Corrosion Science, 1993. 34(10): p. 1707-1713..

Provino N°		7	8	9	10	11	12 p	13	14 p	16 p
Ampiezza	Media	37.83575	40.7825	38.18272	39.56339	36.82667	41.98889	40.9886	45.19184	38.65747
	Mediana	37.3	38.3	37.3	38.5	36.6	40.35	39.6	40	38.1
	Max	44.1	61.1	61.1	77.2	39.6	60.7	54.3	63.3	57.7
Hit rilevati		663	40	2176	762	30	18	421	49	877
Counts	Media	6.844646	7.675	2.913603	17.10892	2.133333	5.777778	6.684086	11.57143	5.620296
	Mediana	3	3	1	5	1	4	3	4	3
	Max	63	58	150	133	10	23	60	59	134
Duration	Media	154.0341	93.525	28.5955	278.1486	92.68667	64.31111	108.6746	100.7306	112.6413
	Mediana	110	34.9	8.8	171.3	33	29.6	66.4	62.2	51
	Max	767.8	634.4	1434.8	1374.4	250.6	240.4	759.4	542.8	1394.8
Provino N°		17	18	19	20	21	23	28	29	30
Ampiezza	Media	36.64047	37.89911	39.0383	38.35242	39.65625	38.76961	38.58294	38.55723	38.36952
	Mediana	36.2	37.3	37	37.7	38.9	38.5	38.1	38.5	37.3
	Max	66.7	47.1	62.9	52.8	50.5	68.2	50.5	50.9	53.9
Hit rilevati		1905	784	141	973	176	46934	8124	2039	1657
Counts	Media	1.721785	2.293367	6.957447	3.772867	5.630682	1.780223	2.434638	1.467386	9.054315
	Mediana	1	2	2	2	4	1	1	1	3
	Max	88	31	86	57	33	56	100	74	144
Duration	Media	16.14761	16.55306	108.1887	54.3815	55.5	13.77649	38.97112	12.74566	167.3151
	Mediana	0.4	13.4	23.8	15.4	48.7	7.4	3.6	4.6	40.4
	Max	851.2	473.8	1017.6	758.6	364.6	787.6	1268	996	2141.6

Tabella 1 Ampiezza, Hit rilevati, Counts e Durata, dati non filtrati dalla localizzazione.

sessione TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

Tecniche termografiche per la progettazione e la manutenzione delle attrezzature a pressione

*E. Pichini**
*U. Giosafatto***
*A. Liedl****

**ISPESL - Dip.to Tecnologie di Sicurezza*
*** CND Service - Controlli Non Distruttivi S.r.l.*
****Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*

1. SOMMARIO

Negli ultimi anni l'analisi termografica all'infrarosso (IR) si è ampiamente diffusa nei diversi settori tecnologici e industriali, con metodologie applicative che si differenziano a seconda dei materiali e/o degli oggetti indagati. Essa si offre come strumento innovativo interessante per la progettazione e il controllo in linea di prodotti, come pure per l'analisi del comportamento di attrezzature durante il loro esercizio. Caratteristica comune di tutte le specifiche applicazioni è quella di rendere possibile il rilevamento a distanza (ovvero senza contatto) di eventuali discontinuità, disomogeneità anche interne, anomalie di funzionamento di componenti (elettrici, meccanici, strutturali), attraverso la misura e la visualizzazione delle radiazioni elettromagnetiche emesse nel termico dalla loro superficie.

Le tecniche termografiche si collocano dunque in posizione di grande rilievo nel settore dei controlli non distruttivi, sia per le applicazioni che già oggi sono possibili, sia per quelle che il continuo sviluppo delle moderne tecnologie fa vedere in prospettiva. D'altro canto, a dispetto dell'immediatezza con cui le tecniche termografiche riescono a fornire informazioni, il tradurre le mappe termiche ottenute in distribuzione reale della temperatura sulla superficie dell'elemento indagato, per trarre da questa informazioni circa la sua funzionalità o il suo stato di integrità, è processo tutt'altro che banale.

Il presente lavoro vuole offrire una panoramica sulle diverse applicazioni delle tecniche termografiche nel settore delle attrezzature e degli insiemi a pressione, per avere un quadro sintetico di quanto e come tali tecnologie vengano attualmente e già da tempo utilizzate, sebbene ancora in mancanza di indicazioni specifiche di tipo normativo: evidenziare potenzialità, limiti e accorgimenti necessari di una tecnica versatile come quella termografica, per cogliere tutte le interessanti prospettive che essa offre anche alla luce delle recenti disposizioni circa l'esercizio delle attrezzature a pressione, e in particolare riguardo all'esercizio delle tubazioni industriali.

2. INTRODUZIONE

I metodi termografici sono una famiglia di tecniche di controllo non distruttivo assai vasta e variegata. Accomunati dalla caratteristica di fornire indicazioni – punto per punto e da remoto - di come la temperatura si distribuisce sulla superficie dell'oggetto osservato e indagato, hanno esordito come tipologia di controllo affascinate, in grado di ampliare le capacità sensoriali umane attraverso una visione oltre il visibile, e finendo con l'illudere che fosse possibile tradurre con immediatezza e semplicità sorgenti di calore in immagini.

Al contrario, la traduzione del dato rilevato in temperatura reale del punto osservato, e la

ricostruzione del complesso di fenomeni fisici responsabili, all'interno e all'esterno dell'oggetto indagato, della distribuzione di temperatura sulla sua superficie, sono tutt'altro che immediate e semplici: presuppongono una conoscenza e una dimestichezza con aspetti della fisica e della termodinamica non elementari, nonché una esercizio continuo nella realizzazione, nella lettura e nella comprensione della "visione" in infrarosso.

Vero è che la distribuzione di temperatura sulla superficie di un elemento dipende da come il calore si trasporta al - o dal - suo interno. Così, conoscendo il regime termico a cui l'elemento è sottoposto, e osservando la distribuzione di temperatura sulla sua superficie, è possibile trarre informazioni circa il materiale che lo compone. Vero non è, invece - o quanto meno non lo è in generale - che si possano "vedere" sorgenti di calore attraverso pareti, con l'efficienza e la risoluzione che talvolta mostrano alcune immagini di grande effetto di film famosi.

Le tecniche termografiche consentono analisi globali (di screening, qualitative) oppure di dettaglio (quantitative), a seconda del metodo di controllo o di misura adottato. Sono particolarmente efficaci per accorgersi da remoto di eventuali anomalie termiche, o per rilevare gradienti termici su superfici estese. Sono di estremo interesse per il controllo dello stato di conservazione o di usura della coibentazione di tubazioni, o per assicurarsi che non vi siano fughe di fluidi in pressione da connessioni o giunzioni. Si prestano per rilevare la presenza di incrostazioni o diminuzioni di spessore all'interno di tubi. Possono fornire informazioni utili alla definizione delle tensioni che si generano in elementi di geometria complessa quando soggetti a sollecitazioni periodiche di frequenza variabile, eventualmente anche elevata.

In generale poi, una volta che lo screening iniziale abbia messo in risalto un'anomalia nella distribuzione della temperatura sulla superficie di un elemento - sia esso una attrezzatura o un suo componente strutturale - si potrà (o si dovrà) ricorrere ad altro tipo di tecnica di controllo non distruttivo per la comprensione dell'eventuale meccanismo di danneggiamento in atto e per la misura puntuale del difetto rilevato.

3. SCOPO DEL PRESENTE LAVORO

Il presente lavoro non ha la pretesa di illustrare aspetti nuovi, ma quella di fare un punto e di fornire un quadro sistematico delle possibili applicazioni della termografia al settore delle attrezzature a pressione, specialmente alla luce della Direttiva 97/23/CE PED e del D.M.329/04.

Infatti, se nell'ambito dei beni culturali le opportunità offerte dalle tecniche termografiche per il controllo non distruttivo di manufatti artistici e/o reperti storici sono ormai note e pressoché indiscusse; se analoga reputazione esse godono nel settore dell'impiantistica elettrica e dell'elettronica; se il loro utilizzo si va sempre più diffondendo nel controllo energetico degli edifici, nel settore delle attrezzature a pressione esse restano ancora avvolte – si direbbe – da un alone di sospetto. Prova ne è il fatto che, ad eccezione di alcune indicazioni di tipo generale, non esistono standard normativi per l'impiego delle tecniche termografiche, né esistono riferimenti tecnici che aiutino il potenziale utilizzatore a individuare il tipo di strumentazione e di tecnica termografica che meglio rispondono al suo scopo.

E questo è probabilmente il punto: la termografia all'infrarosso non è un metodo di controllo non distruttivo, ma una famiglia di metodi che, a seconda del tipo di sensore impiegato o del tipo di sollecitazione termica eventualmente introdotta nell'elemento da indagare, sono in grado - oppure no - di rilevare caratteristiche e/o anomalie della struttura o del materiale di cui l'elemento è composto.

Così, accanto alle strumentazioni termografiche più diffuse e accessibili con cui da anni ormai si controlla l'integrità dei refrattari, o la temperatura di alcuni elementi o punti di riferimento di un impianto, le responsabilità a cui il D.M. 329/04 richiama l'utilizzatore relativamente alla verifica dell'integrità funzionale delle tubazioni e delle linee di trasporto dei fluidi di processo stanno facendo spazio a strumentazioni termografiche dedicate alla leak-detection. Analogamente, il crescente impiego di materiali innovativi e/o compositi nella costruzione di attrezzature a pressione, o di film e strati sottili per la protezione delle superfici contro usure meccaniche o attacchi chimici, trova strumenti e metodi di analisi e di controllo efficaci nelle tecniche termografiche attive, dinamiche ed eventualmente lock-in. E ancora, all'obbligo sancito dalla PED di considerare nel calcolo delle membrature a pressione anche "no pressure loads" quali sollecitazioni del vento o a fatica, possono dare risposta tecniche termografiche quali la

termoelasticità o la termografia cosiddetta ibrida.

Dunque, le tecniche termografiche sono varie e tante, e scopo di questo lavoro è di fornire brevi richiami dei fenomeni termofisici che sfruttano e dei principali parametri che entrano in gioco in ciascuna, per coglierne possibilità di utilizzo e limiti nell'ambito della costruzione e del controllo non distruttivo di attrezzature a pressione.

4. ELEMENTI DI TERMOGRAFIA E DI TECNICA TERMOGRAFICA

Le telecamere a infrarosso non leggono direttamente temperature, ma raccolgono su sensori bidimensionali la radiazione elettromagnetica che i vari punti della superficie inquadrata emettono nello spettro dell'infrarosso; misurano l'intensità di tali radiazioni e, attraverso opportuni algoritmi, le traducono in temperature.

È bene quindi partire da quelle nozioni di fisica che sono indispensabili alla comprensione del fenomeno su cui le tecniche termografiche si basano, e dei parametri che ne regolano e ne condizionano l'utilizzo.

Supponiamo dunque che una telecamera a infrarossi stia inquadrando il corpo C (Fig. 1a) mentre questo è investito da tutte le radiazioni elettromagnetiche che gli provengono da ciò che ha intorno e che è schematicamente rappresentato dal corpo A. A seconda di sue specifiche caratteristiche, C in parte riflette le radiazioni che lo investono, in parte le assorbe e in parte se ne lascia attraversare. Poiché la quota parte di radiazione che C assorbe è la sola in grado di modificarne l'energia interna, le quantità di energia W_ε emessa da C dipende dalla quantità di energia assorbita W_α così da poter affermare che $W_\alpha = \text{kost}\ W_\varepsilon$.

Per il principio di conservazione dell'energia si ha:

$$W_{tot} = W_\alpha + W_\rho + W_\tau = \text{kost}\ W_\varepsilon + W_\rho + W_\tau = 100\%$$

Esprimendo le quote parti di energia assorbita/emessa, trasmessa e riflessa come percentuali dell'energia totale incidente, la precedente si può anche scrivere come:

$$W_{tot} = \varepsilon\ W_{tot} + \rho\ W_{tot} + \tau\ W_{tot}$$

avendo indicato con

ε (emissività) la capacità che ha un corpo di emettere radiazione infrarossa. Più è alta la quantità emessa, più il valore di emissività si avvicina ad 1;

ρ (riflessività) la capacità che ha un corpo di riflettere la radiazione infrarossa. Più è alta la quantità riflessa, più il valore di riflessività si avvicina ad 1;

τ (trasmissività) la capacità che ha un corpo di essere attraversato dalla radiazione infrarossa. Più è alta la quantità di radiazioni che riescono ad attraversare il corpo, più il valore di trasmissività si avvicina ad 1.

Dunque, le quantità di energia emessa, trasmessa e riflessa sono strettamente collegate alle caratteristiche fisiche del materiale, e poiché semplificando la precedente rispetto a W_{tot} si ottiene che

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

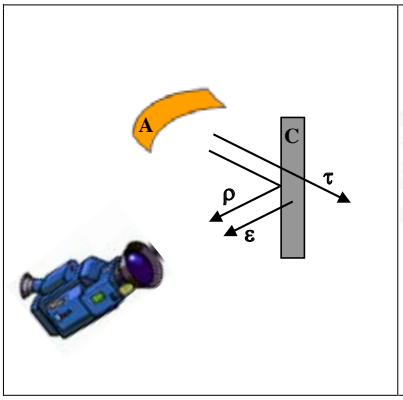
si può affermare che se un corpo ha una elevata emissività, avrà di conseguenza una bassa riflessività e una bassa trasmissività.

Un corpo ideale con emissività pari a 1, avrà riflessività e trasmissività pari a zero: esso è detto "corpo nero", e non riflette né viene attraversato dalle radiazioni che lo colpiscono, ma le assorbe e le riemette soltanto.

In realtà non esistono materiali con le caratteristiche del corpo nero: un oggetto, anche se ha un'elevata emissività, presenta sempre una componente di raggi infrarossi che lo attraversano e una che viene riflessa. Tuttavia, per la stragrande maggioranza dei materiali oggetto di analisi nel termico, la componente infrarossa che attraversa il corpo è trascurabile rispetto alle altre due. Si può allora scrivere:

$$\varepsilon + \rho = 1$$

Questi due parametri (emissività e riflessività) sono fondamentali nella termografia per riuscire ad associare a una certa radiazione infrarossa una temperatura. Come già detto queste caratteristiche dipendono dal tipo di materiale, ma anche da come si presenta la sua superficie.



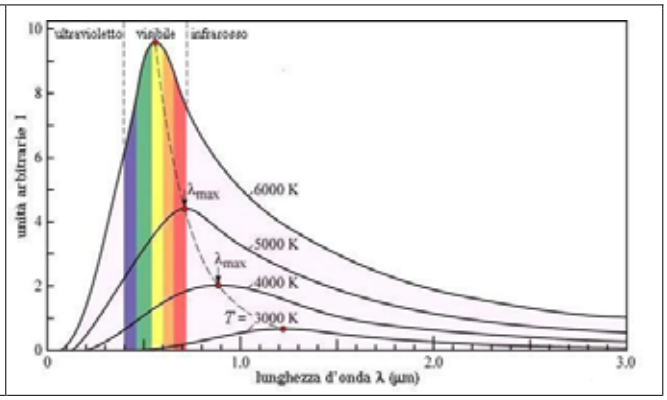


Fig. 1a – Schema di base

Fig. 1b – Spettro di emissione di un corpo nero

Supponiamo ora che C sia un corpo nero, capace cioè di assorbire tutta l'energia che lo colpisce e di riemettere tutta l'energia assorbita. L'energia che ha al suo interno lo doterà di una certa temperatura T. Secondo la legge di Plank, come ogni corpo con temperatura anche molto bassa purché al di sopra dello zero assoluto, C emetterà radiazioni elettromagnetiche con uno spettro che appartiene alla famiglia delle curve riportate in Fig. 1b.

Come si vede, per ciascuna temperatura è tracciata la curva dell'intensità di radiazione (radianza) emessa alle diverse lunghezze d'onda: tanto maggiore è la temperatura del corpo, tanto più la curva si alza e l'area che sottende (energia) aumenta.

Il profilo di tali curve è descritto in forma analitica dalla legge di Plank ([1])

$$I(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

che è di fatto il fondamento di tutti gli algoritmi che traducono in temperatura l'energia elettromagnetica rilevata dalle telecamere IR. In base a tali algoritmi, infatti, le termocamere convertono in segnale elettrico la radiazione infrarossa che raccolgono per irraggiamento da una superficie; quindi "organizzano" il segnale elettrico in immagine digitale a cui – punto per punto – associano il corrispondente valore di temperatura calcolato in base alla legge di Plank. In questo senso, dunque, le termocamere producono immagini visibili di radiazioni invisibili, e permettono all'operatore di risalire alla temperatura superficiale dei corpi che le hanno emesse.

Ma affinché la temperatura determinata possa ritenersi quella effettiva, l'operatore dovrà sempre ricordare che la Legge di Plank vale per corpi ideali, capaci – come s'è detto – di assorbire tutta l'energia che li investe, e di emettere tutta l'energia assorbita. A contrario, nella realtà vi è sempre una quota dell'energia incidente sul corpo che ne viene riflessa, così come ve ne è parte che lo attraversa. Dunque, per poter tradurre correttamente in temperatura l'energia radiante misurata, è essenziale che l'operatore conosca il valore esatto dell'emissività della superficie che ha sottoposto a controllo.

5. TECNICHE TERMOGRAFICHE

Tutte le tecniche di controllo che utilizzano la termografia all'infrarosso si basano dunque sulla rilevazione del flusso radiante proveniente dall'elemento indagato, per mezzo di telecamere sensibili nella banda spettrale dell'infrarosso (termico).

È possibile:

- seguire l'evoluzione temporale del predetto flusso elettromagnetico;
- determinare la distribuzione spaziale delle temperature, mediante specifiche curve di cali-

brazione (basate, come s'è detto, sulla legge di Plank) e la conoscenza delle condizioni al contorno (emissività dell'elemento, trasparenza del mezzo attraverso il quale lo si osserva...).

La presenza di un difetto è rilevata analizzando variazioni o distribuzioni anomale del segnale termico, cioè verificando l'eventuale scostamento tra i valori attesi e quelli misurati. In generale, la presenza del difetto produce una perturbazione del flusso termico all'interno del materiale che, se riferita al materiale non difettoso, si manifesta con una variazione nello spazio, e talvolta nel tempo, della temperatura superficiale.

5.1. Classificazione sulla base dei metodi di stimolazione del componente sottoposto a prova

Una principale distinzione tra i diversi metodi si basa su chi/cosa ingenera il campo termico grazie al quale si rilevano le caratteristiche dell'elemento in analisi.

5.1.1. Modalità passiva - Le variazioni di temperatura sono prodotte da sorgenti naturali oppure da processi fisici non attivati dalla misura e comunque presenti.

5.1.2. Modalità attiva - Il componente indagato è stimolato termicamente da sorgenti radianti, flussi di gas a temperatura diversa da quella ambiente, o da sollecitazioni meccaniche.

5.2. Classificazione sulla base delle condizioni termiche

Esistono due approcci anche relativamente l'applicazione del principio fisico, a seconda che la prova sia condotta in condizioni termiche stazionarie o transitorie. In generale, se i difetti hanno una distribuzione spaziale continua, deve essere utilizzata la tecnica dinamica; se i difetti sono localizzati, possono essere utilizzate sia la tecnica statica sia la tecnica dinamica.

5.2.1. Tecnica statica - Il campo termico presente sul componente sottoposto a prova non dipende dal tempo. Generalmente, il parametro termofisico che si sfrutta è la resistenza termica del materiale che viene attraversato da un flusso termico costante.

5.2.2. Tecnica dinamica - Il campo termico presente sul componente sottoposto a prova è studiato nel dominio del tempo in regime termico transitorio. Generalmente, i parametri termofisici utilizzati sono la diffusività termica o l'inerzia termica.

La tecnica dinamica può essere:

- impulsata, se la variazione di temperatura è imposta mediante un flusso termico che idealmente è rappresentabile da un impulso di Dirac;
- modulata, se il flusso è applicato in modo variabile nel tempo; la soluzione più facile dal punto di vista della elaborazione dei dati è uno stimolo sinusoidale ad ampiezza costante.

6. APPLICAZIONI DELLA TERMOGRAFIA NELLA PROGETTAZIONE E NEL CONTROLLO DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

Gli elementi di termofisica e di tecnica precedentemente richiamati sono quelli che servono per cogliere le specificità delle diverse applicazioni della termografia al settore delle attrezzature e degli impianti a pressione, di cui si offre ora una panoramica.

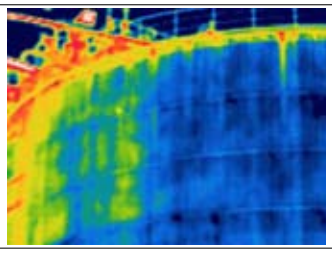
6.1. Termografia passiva statica

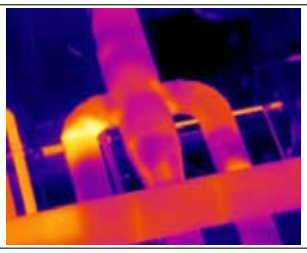
Laddove si possa supporre che il flusso di calore attraverso la parete dell'attrezzatura oggetto del controllo sia costante nel tempo, la diversa temperatura che potranno eventualmente avere due diversi punti di una stessa superficie ("stessa" anche in termini di emissività), dipenderà da una diversa resistenza termica opposta dalla parete in corrispondenza dei due diversi punti.

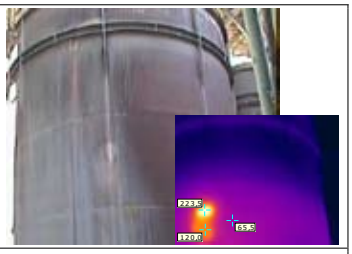
Pertanto, lo studio delle immagini rilevate nel termico (Fig. 2) permetterà di individuare quei punti o quelle zone dove, per esempio, uno strato di coibente o di refrattario si è usurato, oppure una membratura si è assottigliata o presenta incrostazioni o depositi.

Se poi è nota l'emissività delle superfici inquadrate, se ne potranno anche determinare punto per punto i valori effettivi della temperatura, e da questi eventualmente risalire ad altre grandezze in gioco, al fine di valutare la funzionalità e l'ulteriore esercibilità dell'attrezzatura indagata.

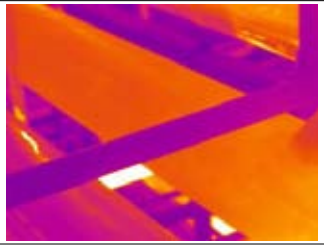
La tecnica si presta, altresì, per il controllo dei flussi attraverso tubazioni e/o valvole onde verificare che le prime non siano ostruite e che le seconde funzionino correttamente.

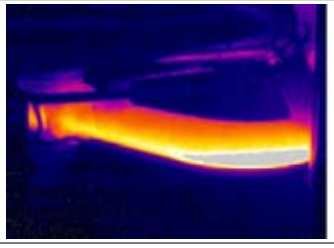

Controllo della coibentazione

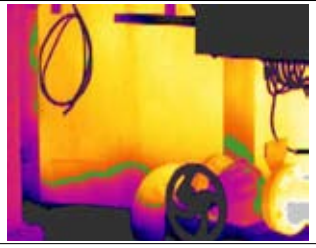

Danneggiamento del refrattario

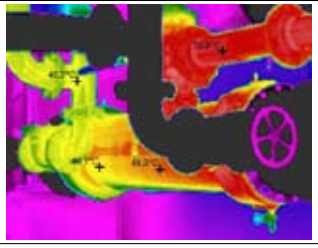

Usura del refrattario

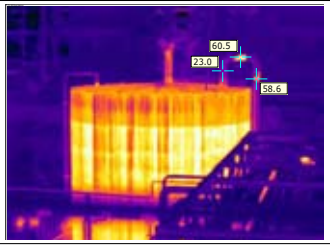

Tubi radianti di forni di processo


Controllo del flusso in tubazioni

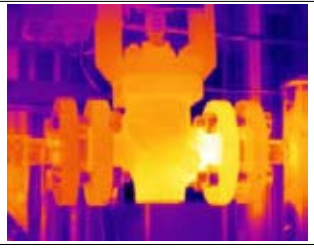

Corrosione di tubazioni

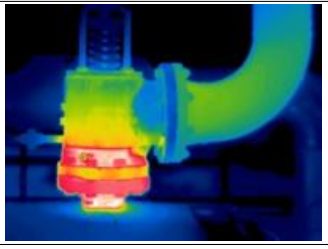

Depositi in fondi di serbatoi


Misure di temperatura su linee



Misure di temperatura su piping


Anomalie di flussi


Controlli di perdita di valvole


Fughe di gas

Fig. 2 – Applicazioni della termografia passiva statica

6.2 Termografia passiva dinamica

Se il materiale di cui è costituita la membratura oggetto d'indagine è un buon conduttore termico, o se la parete è molto sottile e dunque la sua resistenza termica è comunque bassa, condizioni di flusso termico stazionarie produrranno una distribuzione omogenea della temperatura sulla superficie che impedirà, di fatto, di far risaltare le eventuali zone di danneggiamento

della parete. Saranno invece estremamente utili tutti i transitori termici, siano essi procurati da condizioni di temperatura non costante del fluido che la membratura contiene, oppure procurati da condizioni di temperatura non costante dell'ambiente esterno alla membratura stessa. La Fig. 3 riporta le prove effettuate su tubazioni in acciaio in cui sono stati appositamente praticati degli assottigliamenti puntuali dello spessore onde evidenziare la sensibilità del metodo. La termografia di sinistra è stata effettuata durante il transitorio termico procurato portando il fluido circolante al suo interno da 150 °C a temperatura ambiente. La termografia di destra mostra invece la distribuzione delle temperature sulla superficie della tubazione in un istante del transitorio termico procurato raffreddando la tubazione dall'esterno (con del gas refrigerante) poi che questa era stata uniformemente riscaldata.

Transitori termici che possono tornare utili sono dunque quelli che si ingenerano naturalmente all'alba o al tramonto in attrezzature poste all'aperto. Oppure quelli procurati – quando si può – raffreddando con acqua o gas refrigeranti le loro superfici.

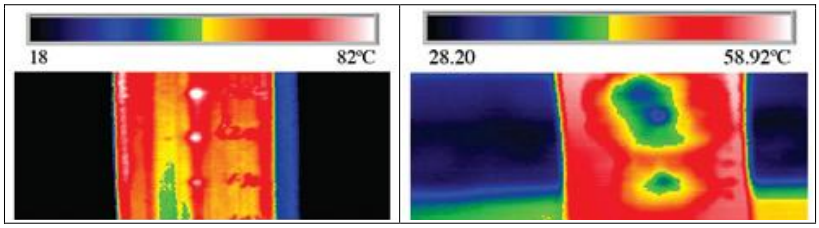


Fig. 3 – Applicazioni della termografia passiva dinamica

6.3 Termografia attiva statica.

Se il materiale di cui è costituita la membratura oggetto d'indagine non è un buon conduttore termico, o se la parete è composta da più strati di materiali diversi, e si teme che vi siano inclusioni o cavità nello spessore, o scollamenti tra gli strati, si può pensare di procurare un flusso termico costante dall'interno all'esterno della parete (o viceversa) e osservare la distribuzione della temperatura sulla superficie. Anche in questo caso il parametro che consente di evidenziare le difettosità eventualmente presenti, è la resistenza termica del materiale. Nell'ambito delle attrezzature a pressione - che in genere sono realizzate con materiali metallici, buoni conduttori di calore – questo tipo di tecnica termografica non ha di fatto molte applicazioni. Tuttavia, essa potrebbe rivelarsi utile nel controllo non distruttivo (in costruzione come in esercizio) di attrezzature in materiale composito o polimerico.

6.4 Termografia attiva dinamica.

Molto più utilizzate sono invece quelle tecniche termografiche in cui l'elemento oggetto di indagine è sottoposto a sollecitazione termica o meccanica o ottica o elettrica che varia nel tempo e che produce nell'oggetto una distribuzione spaziale/temporale dell'energia che questo contiene, e conseguentemente una distribuzione spaziale/temporale della temperatura sulla sua superficie.

L'andamento temporale della sollecitazione è in genere di tipo "a gradino", o impulsato, oppure sinusoidale.

La Fig. 4 riporta il transitorio termico ingeneratosi sulla superficie di una lastra metallica sottile, senza e con difettosità, all'istantaneo variare delle condizioni termiche imposte agli estremi della lastra stessa.

Una tecnica termografica ormai ben consolidata – e tra l'altro una delle pochissime per cui sia stato già redatto uno standard nazionale - è quella impulsata in cui, in genere, l'elemento oggetto di indagine viene sollecitato mediante dei potenti flash di luce bianca o degli impulsi laser (a infrarossi). La superficie dell'elemento assorbe l'energia incidente, e questa si diffonde all'interno, entro un certo spessore, in base alla diffusività del materiale di cui l'elemento è composto. La diffusività termica di un materiale ($^{(2)}$) è una caratteristica intrinseca del materiale e misura la sua maggiore o minore capacità di diffondere calore. Tanto maggiore è la diffusività

termica di un materiale, tanto più velocemente il calore si diffonde dalla superficie verso l'interno; così se sotto aree diverse di una stessa superficie vi sono zone di materiale con diversa diffusività – per la presenza di inclusioni o cavità o delaminazioni – queste possono essere rilevate in base alla distribuzione superficiale della temperatura (letta nel tempo, come ampiezza e ritardo rispetto al flash o all'impulso laser assorbito dalla superficie stessa).

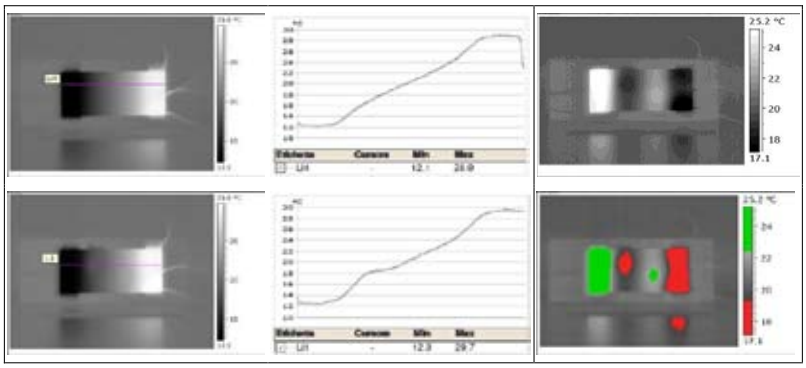


Fig. 4 - Applicazioni della termografia attiva dinamica

La termografia impulsata trova applicazione nel controllo dei rivestimenti metallici protettivi delle pale delle turbine, per verificarne l'usura o l'adesione con il materiale sottostante. Ma è pensabile che essa possa trovare impiego anche nel controllo dei rivestimenti protettivi di attrezzature costruite per fluidi di processo particolarmente aggressivi.

Se poi la sollecitazione termica a cui viene sottoposto l'oggetto da indagare ha andamento sinusoidale, e se la radiazione emessa dall'oggetto è filtrata dal rilevatore alla stessa frequenza (temporale) della sollecitazione, la tecnica prende il nome di "lock-in". La sincronizzazione del rilevatore con la sollecitazione permette di amplificare i segnali termici che dipendono da quella, e di escludere il rumore termico di fondo e ogni altra radiazione elettromagnetica che giunge alla telecamera IR con frequenza diversa da quella della sollecitazione. A questo punto, poiché la radiazione termica rilevata dalla telecamera IR sarà solo quella emessa dalla superficie indagata per effetto della sollecitazione termica incidente e delle proprietà strutturali sub superficiali, queste ultime potranno essere ben evidenziate mediante l'analisi della distribuzione superficiale della temperatura, anche in questo caso letta nel tempo, come ampiezza e fase rispetto alla sollecitazione.

La tecnica si presta alla rilevazione di inclusioni, delaminazioni, zone di non adesione tra eventuali strati in materiali di qualsiasi tipo, sebbene quanto più è alta la loro conducibilità (e quindi diffusività) termica, tanto più veloce deve essere il sistema di rilevazione del segnale. Il termogramma a sinistra di Fig. 5 è relativo alla rilevazione del danneggiamento determinatosi a seguito di un impatto in un materiale composito.

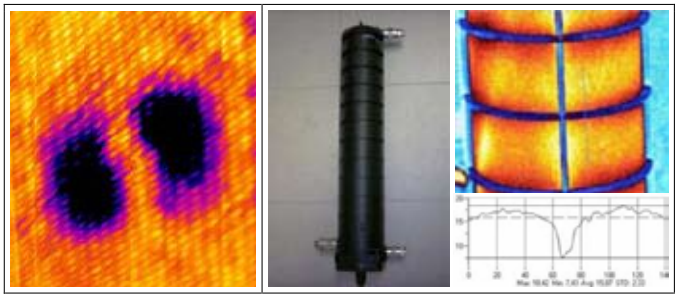


Fig. 5 - Applicazioni della termografia lock-in e della termoelasticità

D'altro canto, all'interno del materiale o dell'elemento che si vuole sottoporre ad indagine, un campo termico variabile nel tempo può essere generato anche da sollecitazioni esterne che non siano radiazioni elettromagnetiche incidenti sulla superficie. Si può ad esempio pensare di sottoporre il materiale o l'elemento a vibrazioni meccaniche, e di rilevare - in modo sincrono con la frequenza di vibrazione – la distribuzione superficiale di temperatura determinata dall'"affiorare" del calore prodottosi all'interno. Questa particolare tecnica prende il nome di termoelasticità e, entro determinati spessori, permette analisi non solo qualitative di materiali e componenti: infatti, quando la frequenza delle vibrazioni meccaniche a cui viene sottoposto il materiale o l'elemento è elevata tanto da poter ipotizzare condizioni adiabatiche ([3]), è possibile determinare il valore delle tensioni che si concentrano nei diversi punti a partire dalla misura delle temperature che questi raggiungono. A questo proposito vale la pena ricordare che con la Direttiva PED sono divenuti parametri di calcolo anche "non pressure loads" quali intensità del vento o terremoto, nonché sollecitazioni a fatica specie su zone critiche come giunzioni (saldate e non) e bocchelli. Dovendo ipotizzare tali tipi di sollecitazioni - e a maggior ragione se per materiali e/o geometrie particolari - può risultare dubbia o comunque non sufficiente la sola determinazione analitica dei carichi che si concentrano in alcuni punti o la resistenza meccanica di sezioni o giunzioni. In questi casi l'esecuzione di prove termoelastiche su prototipi, eventualmente abbinate ad analisi FEM (termografia ibrida), può offrire al progettista un utilissimo strumento di verifica delle scelte progettuali effettuate. Il riquadro destro di Fig. 5 riporta l'analisi termoelastica della distribuzione degli stress in un serbatoio di materiale plastico.

7. TERMOCAMERE SHORTWAVE E LONGWAVE

Finora nessun cenno è stato fatto relativamente alla presenza dell'aria tra l'elemento oggetto d'indagine e la telecamera IR utilizzata. In realtà (Fig.6) l'aria non presenta uguale trasmittanza per tutte le radiazioni IR, ma è pressoché trasparente solo in alcuni intervalli dello spettro, e in particolare: nell'infrarosso più vicino al visibile, per lunghezze d'onda comprese tra i 2 e 5,5 µm, per lunghezze d'onda comprese tra i 7,5 e i 14,5 µm. In corrispondenza di questi ultimi due intervalli sono stati messi a punto sensori diversi che caratterizzano le telecamere IR rispettivamente come ShortWave e LongWave.

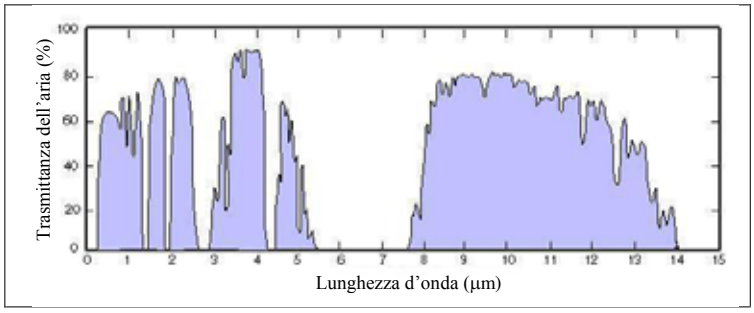


Fig. 6 – Spettro di trasmittanza dell'aria

Le termocamere SW si prestano meglio alla rilevazione dell'energia termica radiante da corpi/superfici ad altissima temperatura: infatti, poiché per la legge di Wien all'aumentare della temperatura il massimo di emissione si sposta verso lunghezze d'onda minori, i rilevatori che operano tra i 2 e i 5 µm offrono una maggiore sensibilità. Esse pertanto sono le più adatte per il controllo dei componenti (tubazioni, refrattari...) dei forni per raffineria, nonché per la rilevazione e – opportunamente equipaggiate – l'analisi dei prodotti di combustione. Al contrario, per temperature medio/basse (ovvero da sotto zero a qualche centinaio di °C), e sempre per la legge di Wien, sono le termocamere LW a offrire migliori prestazioni: la loro minore sensibilità è compensata da una maggiore quantità di energia disponibile nell'intervallo di lunghezze d'onda in cui operano, e dall'assenza di radiazione solare di disturbo; inoltre le termocamere LW

risultano anche meno sensibili all'aria frapposta tra la termocamera e la superficie dell'oggetto inquadrato, e quindi si prestano meglio per controlli da grande distanza.

In sintesi, valgono le seguenti indicazioni di massima:

	Banda Spettrale SW	Banda Spettrale LW
Liquidi	X	X
Gas	X	
Alte temperature	X	
Basse temperature		X
Visione vicina	X	X
Visione lontana		X

8. LIMITI E ACCORGIMENTI UTILI

Uno degli errori che più frequentemente si compiono nell'esecuzione di controlli termografici è la non esatta conoscenza dell'emissività dell'oggetto indagato. S'è detto, invece, che l'emissività è un parametro essenziale affinché l'energia radiante rilevata possa essere correttamente tradotta in temperatura superficiale. Se l'emissività dell'oggetto o delle superfici indagate non è nota, il controllo termografico fornisce solo indicazioni qualitative, e la sua utilità resta limitata a quei casi in cui si cerchino - e siano eventualmente sufficienti - informazioni "per confronto" tra attrezzature dal funzionamento analogo o tra termogrammi realizzati sulla stessa attrezzatura in due o più tempi diversi.

Il controllo termografico delle attrezzature a pressione risente di un ulteriore limite, anch'esso legato all'emissività dei materiali oggetto di indagine che, per la maggior parte, sono metalli. Questi, salvo che non siano particolarmente ossidati (e in alcuni casi neanche questo è sufficiente) hanno un'elevata riflettività nel termico e conseguentemente una ridottissima emissività. Tale caratteristica fa sì che possa talora essere significativa la quota parte di radiazioni che la superficie indagata non emette di suo, ma che le provengono dall'ambiente circostante e che lei riflette. In presenza di riflessioni che non si sia in grado di individuare come tali, non solo la determinazione delle temperature, ma anche l'analisi qualitativa della loro distribuzione sulla superficie indagata risulta affetta da errori.

E proprio allo scopo di eliminare gli errori connessi con la scarsa conoscenza dell'emissività di un materiale, o con un suo bassissimo valore, sarebbe di estremo vantaggio per l'esecuzione dei controlli termografici se le superfici delle attrezzature a pressione, al termine della fabbricazione, fossero verniciate con pigmenti di emissività nota e possibilmente elevata.

Ma anche quanto l'operatore termografico è esperto e conosce con esattezza tutti i parametri che influiscono sulla rilevazione del segnale e sulla determinazione delle temperature in gioco, l'efficacia del controllo termografico su attrezzature in esercizio raggiunge veramente il massimo livello solo se inserito in un piano ispettivo mirato che prevede la creazione di un database delle immagini termiche delle attrezzature stesse: infatti, il confronto tra termogrammi effettuati a scadenze regolari, o comunque in tempi diversi, consente di apprezzare con dettaglio molto maggiore le eventuali variazioni delle distribuzioni termiche superficiali e correlarle a possibili malfunzionamenti o danneggiamenti in atto.

9. LAST BUT NOT LEAST

Lo sguardo panoramico offerto sulle molteplici possibili applicazioni delle diverse tecniche termografiche mostra quanta e quale utilità esse già hanno – e ancor più potrebbero avere – nel "mondo" delle attrezzature a pressione, sia nelle fasi di studio/scelta/progetto di materiali e geometrie, sia nell'ordinarietà o eccezionalità del loro esercizio. A tale proposito è bene anche ricordare che, con l'UNI TS 11325-1:2009, la termografia è stata riconosciuta come metodo di screening efficace, e dunque utilizzabile, per valutare lo stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica d'integrità.

D'altro canto sorprende la quasi totale mancanza di riferimenti normativi e standard tecnici che, a seconda dei suoi vari possibili utilizzi, diano indicazioni operative precise: la termografia è indicata tra le metodologie di controllo per cui la EN 473 definisce l'iter di qualifica e di certificazione del personale addetto la prove, ma in Italia l'UNI non è ancora riuscito – per esiguità delle risorse umane interessate e coinvolte - a elaborare un documento che faccia propri i contenuti dell'ISO/DIS 10878 – "Non-destructive testing — Infrared thermography — Vocabulary", documento elaborato dall'ISO/TC 135/SC 8 e al momento di fatto unico standard internazione disponibile.

Esiste poi un interessantissimo documento, l'ISO/CD/18434 - "Condition monitoring and diagnostics of machines using thermal imaging - part 1 – general guidelines" che descrive i metodi di controllo termografico assoluti e comparativi, per trarre informazioni sia qualitative che quantitative, e offre nozioni elementari di termografia e indicazioni circa le attenzioni da porre nell'interpretazione dei risultati. Anche questo documento è al momento l'unico disponibile del suo genere.

Si spera che, di pari passo con il riconoscimento di efficacia dei controlli termografici nell'ambito della progettazione, dell'esercizio e della manutenzione delle attrezzature a pressione, cresca anche il numero di coloro che vorranno collaborare alla stesura di linee guida e/o di standard operativi ad essi dedicati.

10. RIFERIMENTI NORMATIVI E BIBLIOGRAFIA

- UNI 10824-1:2000 Prove non distruttive - Termografia all'infrarosso – Parte 1: Termini e definizioni.
- Doc. prep. UNI U45001000 "Prove non distruttive – Termografia all'infrarosso – Principi generali".
- Doc. prep. UNI U45040299 "Prove non distruttive – Termografia all'infrarosso – Identificazione di difetti di adesione di rivestimenti sottili in ambito industriale" (UNI 10824-9).
- UNI/TS 11325-1:2009 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 1: Valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica d'integrità.
- G.Shen, T.Li: "Infrared thermography for high-temperature pressure pipe", NDT.net, Insight. vol. 49, n. 3, 2007, pp. 151-153.
- E.Pichini, G.Bovesecchi, A.Pandurino: "Measurements thermophysical and thermofluid dynamic properties of materials by means of IR thermography", Proceedings of InfraMation 2008, pp. 345-354, Reno, Nevada, 2008.

- *Si ringrazia il Prof. Gianluca Rossi del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia per aver gentilmente messo a disposizione le immagini riportate in Fig. 5..*

NOTE

(1) La legge di Plank racchiude come soluzioni particolari anche la legge di Stefan-Boltzmann, secondo cui la potenza irradiata da un corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura, e la legge dello spostamento di Wien, secondo cui all'aumentare della temperatura il massimo di emissione si sposta verso lunghezze d'onda minori.

(2) La diffusività termica λ di un materiale è definita come il rapporto $k/\rho c$ fra il coefficiente di conducibilità termica del materiale k e il prodotto tra la sua densità ρ e il suo calore specifico c

(3) In tali condizioni il calore che si produce localmente per effetto termomeccanico, non riesce a condursi altrove.

sessione TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

I serbatoi di stoccaggio ammoniaca a pressione atmosferica: Fitness For Service, analisi Leak Before Break, selezione di strategie ispettive non intrusive consolidate (UT TOFD e Phased Array) e possibili sviluppi con emissioni acustiche (AT)

*G. Franceschini**
*G.A. Zuccarello***
**Inspection and Material Engineer, Yara Upstream Production*
***I.S.P.E.S.L. - Dipartimento Territoriale di Bologna*

SOMMARIO

I serbatoi di stoccaggio ammonica contengono grandi quantità di ammoniaca liquida (da 5kTon a 40kTon) a pressione atmosferica a -33°C. Per la quantità e tossicità del fluido in essi contenuto, un'eventuale rottura potrebbe avere conseguenze estremamente gravi sulla popolazione sia interna che esterna al sito industriale. Tali apparecchiature non sono tuttavia soggette a fenomeni corrosivi importanti, né interni né esterni, e pertanto vengono esercite a ciclo continuo per molti anni (da 15 a 20 anni) prima di effettuare un'ispezione per verificarne lo stato di integrità in accordo alle linee guida fornite dalla "European Fertilizer Manufacturers Association", *EFMA* [2].

Il meccanismo di danneggiamento più pericoloso per questo tipo di apparecchiature è la tensocorrosione da ammoniaca (*Ammonia Stress Corrosion Cracking, NH3 SCC*): questo è un fenomeno molto lento che si può verificare solo in presenza di ossigeno e contenuto di acqua inferiore allo 0.2% e che si manifesta sotto forma di cricche che, partendo dalla superficie interna del serbatoio, possono eventualmente propagarsi attraverso lo spessore della parete del serbatoio.

Per rilevare cricche da *NH3 SCC* si può ispezionare la superficie interna del serbatoio: così facendo, si rende necessario lo svuotamento e l'apertura del serbatoio stesso consentendo l'ingresso di ossigeno e quindi aumentando il rischio di attivare od aggravare un meccanismo di *NH3 SCC*. È per tale motivo che la tendenza attuale è quella di utilizzare tecniche ispettive non intrusive che consentano di verificare lo stato di integrità del serbatoio senza la necessità di aprirlo e metterlo fuori servizio con il duplice vantaggio di evitare sia l'introduzione di ossigeno che l'interruzione nell'esercizio del serbatoio stesso.

Per consentire una continuità di esercizio senza pregiudicarne la sicurezza [1], è necessario disporre di opportune tecniche ispettive (Controlli Non Distruttivi, CND) efficaci nel rilevare e dimensionare eventuali discontinuità strutturali e di un criterio di accettabilità adeguatamente conservativo definito con un'analisi di integrità strutturale basata sui concetti della meccanica della frattura.

1. PROCESSO ISPETTIVO DI UN SERBATOIO DI STOCCAGGIO AMMONIACA

L'ispezione non intrusiva di un serbatoio di stoccaggio di ammoniaca liquida a pressione atmosferica è un processo complesso costituito da diverse fasi:

1. Analisi di integrità strutturale del serbatoio;
2. Ispezione non intrusiva del serbatoio con Controlli Non Distruttivi (CND);
3. Confronto delle indicazioni fornite dai CND con il criterio di accettabilità definito nell'analisi di integrità di cui al punto 1;
4. Definizione di un piano ispettivo in funzione del confronto di cui al punto 3;
5. Eventuale nuova analisi di integrità strutturale del serbatoio riducendone le assunzioni conservative adottando modelli più complessi: analisi ad elementi finiti, approccio probabilistico [9] per valutazione della tenacità a frattura;
6. Confronto delle indicazioni fornite dai CND con il criterio di accettabilità definito nell'analisi di integrità di cui al punto 5;
7. Definizione di un di un piano ispettivo in funzione del confronto di cui al punto 6.

Data la complessità dell'argomento, in questo articolo si tratterà solo dei primi quattro punti del processo descritto sopra (vedi parte evidenziata in rosso di Fig. 1) tralasciando l'analisi ad elementi finiti (*Finite Element Method, FEM*) e l'approccio probabilistico [9], caratteristico di un'analisi più complessa che può eventualmente essere necessaria per il mancato riscontro del criterio di accettabilità definito con la prima analisi.

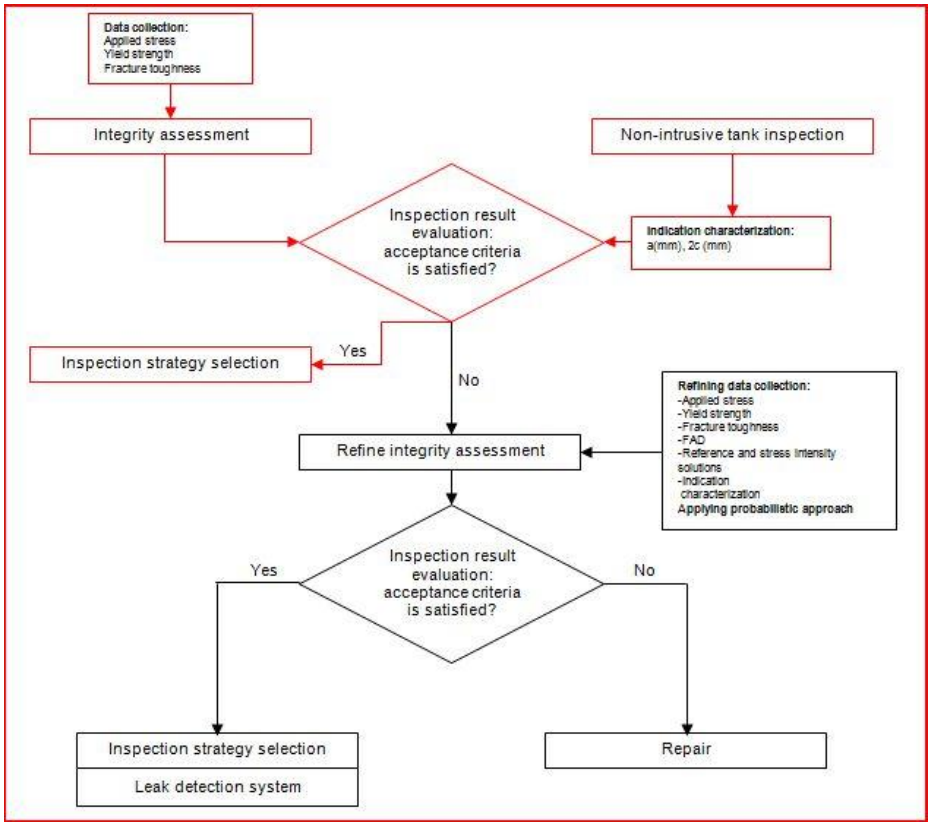


Fig. 1 – Processo ispettivo di un serbatoio di stoccaggio ammoniaca

2. ANALISI DI INTEGRITÀ STRUTTURALE DEL SERBATOIO

Lo scopo di un'analisi di integrità strutturale è quello di determinare, in posizioni critiche della parete del serbatoio (Fig. 2), le dimensioni massime accettabili di eventuali cricche *NH3 SCC*. Per il calcolo della lunghezza e profondità ammissibili di eventuali cricche vengono utilizzati codici derivati dalla meccanica della frattura come BS7910 [3] e API579 parte 9 [4] considerando sia difetti superficiali che passanti. Questi ultimi vengono analizzati per effettuare una previsione sulle modalità di rottura in caso di propagazione del difetto stesso: rottura catastrofica (*Break Before Leak, BBL*) o rottura stabile (*Leak Before Break, LBB*).

Configuration	Longitudinal or circumferential joint	Parallel or transversal crack
A1	Longitudinal	Transversal
B1	Longitudinal	Parallel
C1	Longitudinal	Parallel
C1	Circumferential	Transversal
D1	Circumferential	Transversal
E1	Circumferential	Parallel

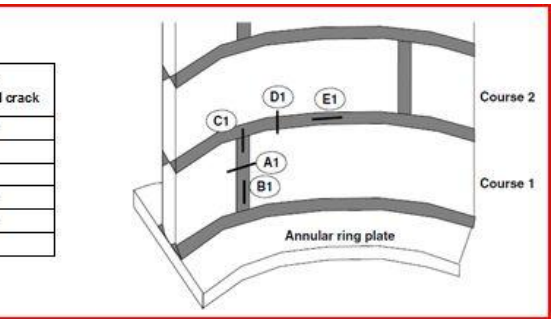


Fig. 2 – Configurazioni di difetto analizzate

L'analisi si basa sul metodo FAD (*Failure Assessment Diagram*) la cui procedura è illustrata in Fig. 3.

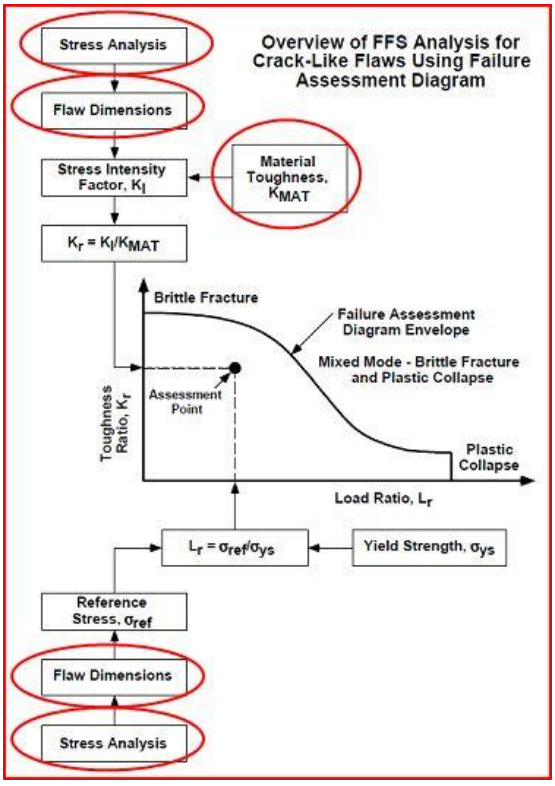


Fig. 3 – Procedura di analisi Fitness For Service (FFS) basata sul diagramma FAD

Per l'analisi viene utilizzato il digramma *FAD* generalizzato illustrato in Fig. 4 (non si richiedono dati di tensione/deformazione del materiale specifico) con un valore di *cut-off per il Load Ratio*, Ly uguale ad 1.

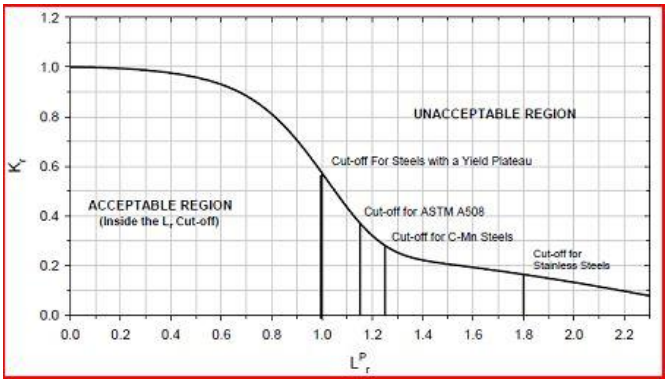


Fig. 4 – Diagramma FAD generalizzato

L'utilizzo del digramma *FAD* generalizzato anziché del digramma *FAD* specifico per il materiale esaminato è giustificato dal fatto che solo per valori di Ly>0.7 (condizione solitamente non raggiunta nel caso di serbatoi ammoniaca a pressione atmosferica) si ottiene una differenza significativa tra i due. Tuttavia, se utilizzato, il digramma *FAD* specifico viene costruito dai valori di allungamento a rottura secondo il modello di *Ramberg-Osgood*. In Fig. 5 viene rappresentato il diagramma *FAD* generalizzato insieme al digramma *FAD* specifico.

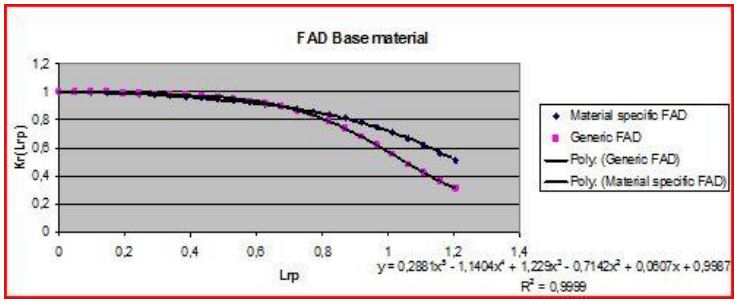


Fig. 5 – Diagramma FAD generalizzato e specifico: differenza significativa solo per L_y>0.7

Il digramma *FAD* definisce il limite di accettabilità di un indicazione lineare: all'interno della regione delimitata dal diagramma l'indicazione è accettabile; all'esterno, la discontinuità assume la connotazione di difetto e potenziale causa di rottura fragile o collasso plastico del componente. Si tratta quindi di calcolare i due parametri *Toughness ratio,* K_y *e Load Ratio,* L_y per le generiche configurazioni di cricca analizzate (vedi Fig. 2) e, con un processo iterativo si calcolare le dimensioni massime di cricca per cui il punto di analisi (L_y, K_y) cada ancora all'interno del diagramma. Per ogni configurazione analizzata si determinano in tal modo le dimensioni (profondità, a_{max}, e lunghezza $2c_{max}$) massime accettabili per eventuali discontinuità lineari.

Allo stesso modo, per ogni configurazione analizzata, si ipotizza un difetto passante (profondità della cricca, a, uguale allo spessore di parete). Effettuando nuovamente il calcolo sopra descritto, si determina un limite superiore per la lunghezza di una discontinuità lineare passante entro cui il punto di analisi cada ancora all'interno del diagramma *FAD*: spiegazione fisica di questo è che se la discontinuità ipotizzata propagasse attraverso la parete di un serbatoio soggetto a pressione interna (dovuta all'altezza di liquido in esso contenuto) non causerebbe un rottura catastrofica ma una perdita: utilizzando sistemi di rilevazione (*leak detection system*), è

così possibile intraprendere le azioni correttive necessarie ad evitare la rottura catastrofica del componente stesso. Questo tipo di valutazione è chiamata analisi *Leak-Before-Break* (*LBB*).

In tal modo si definisce il criterio di accettabilità per eventuali indicazioni lineari:

- la lunghezza, $2c$, dovrà essere inferiore a quella critica, $2c_{max}$ determinata con analisi LBB (con opportuno margine di sicurezza in funzione dell'incertezza di misura del CND impiegato per dimensionare la cricca);
- la profondità, a, dovrà essere inferiore a quella critica, a_{max}, calcolata nell'analisi di integrità strutturale del serbatoio e comunque limitata inferiormente dal valore ottenuto con considerazioni di solo collasso plastico (al fine di evitare anche la condizione di perdita).

Nella Fig. 6 si riporta a titolo di esempio il grafico risultato dal calcolo iterativo sopra descritto per una configurazione tipo B1 di un serbatoio di stoccaggio ammoniaca istallato nel sito produttivo Yara di Ambes in Francia i cui dati generali sono riportati nella Tab. 1 sottostante.

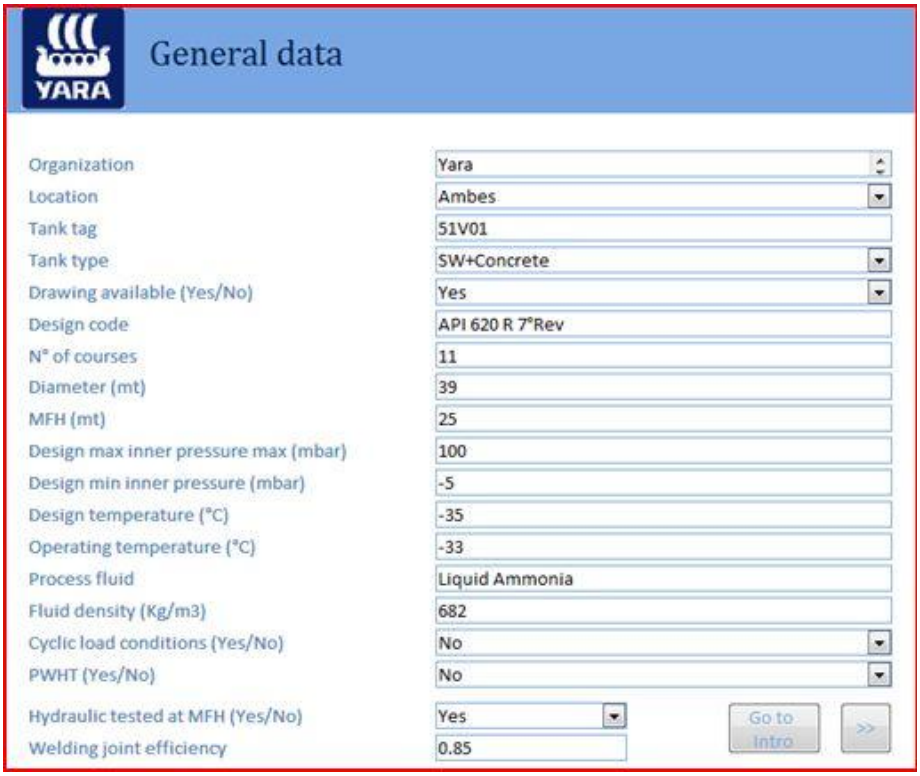


Tabella 1 – Dati generali serbatoio stoccaggio ammoniaca Yara Ambes, Francia

Dal grafico di Fig. 6 si è ricavato il criterio di accettabilità a<11mm e 2c<20.4mm.

I parametri K_r e L_r si ottengono implementando le formule contenute in codici come BS7910 [3] e API579 [4]. In quest'articolo, tralasciamo le procedure di calcolo dei parametri K_r e L_r poiché già ben descritte nei codici menzionati. Più interessante è invece descrivere le grandezze in ingresso per il calcolo di tali parametri (vedi Fig. 3, parti della procedura cerchiate in rosso):

1. Proprietà dei materiali ed in particolare la tenacità a frattura;
2. Analisi delle tensioni agenti sul serbatoio;
3. Caratterizzazione delle indicazioni ai fini analitici.

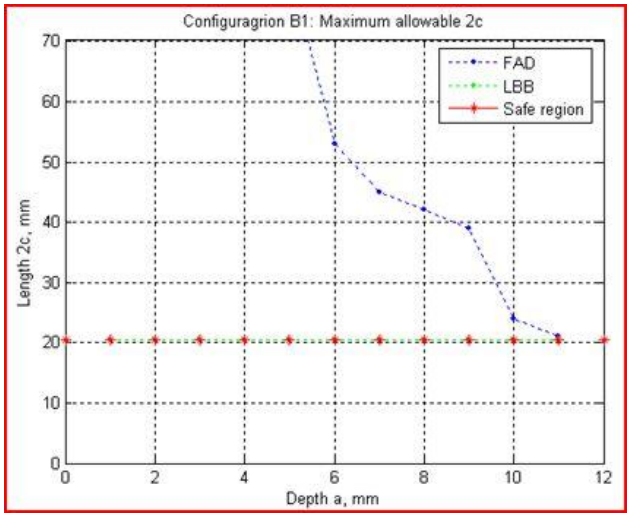


Fig. 6 – Determinazione di 2cmax ed amax per la configurazione di difetto B1 di un serbatoio di stoccaggio ammoniaca

2.1. Proprietà materiali

Per un'analisi di integrità strutturale è necessario conoscere le proprietà meccaniche dei materiali (sia del materiale base delle virole che delle saldature del serbatoio): tra queste, quelle che maggiormente influiscono sul risultato (lunghezza, $2c_{max}$, profondità, a_{max}, di cricca) sono il carico di snervamento σ_y e la tenacità a frattura K_{IC}.

Per la verifica al collasso plastico viene adottato un carico di snervamento pari al valore minimo (ipotesi conservativa) tra quelli riportati nei certificati dei materiali base e nelle qualifiche dei procedimenti di saldatura. Al contrario, per la valutazione delle tensioni residue di saldatura, viene adottato il massimo (ipotesi conservativa) tra i valori di snervamento riportati nei certificati dei materiali base e nelle qualifiche dei procedimenti di saldatura.

La tenacità a frattura di un materiale può essere definita come la resistenza del materiale stesso alla propagazione di una cricca. Per descrivere la tenacità a frattura sono disponibili diversi parametri come il fattore di intensità degli sforzi critico, K_{IC}, il valore critico dell'integrale J o del *CTOD (crack tip opening displacement)*. Idealmente, il valore di tenacità a frattura da utilizzare per l'analisi, dovrebbe essere quello ricavato da prove di meccanica della frattura specifiche. Tuttavia, per serbatoi in esercizio già da molti anni, tali prove (o i risultati di tali prove) non sono usualmente disponibili. Per ottenere un valore limite inferiore di K_{IC} si utilizzano pertanto formule di correlazione con i valori di energia ottenuti da prove di resilienza *Charpy V-Notch*. I risultati di tali prove sono infatti molto spesso disponibili anche per serbatoi di stoccaggio ammoniaca in esercizio già da molti anni. Nonostante non si ottenga certo il valore "vero" della tenacità a frattura, con tali formule si ottiene un valore conservativo della tenacità a frattura che può essere utilizzato nell'analisi.

2.2 Analisi delle tensioni

Ogni configurazione di difetto analizzata (vedi la Tab. 2 sottostante) è caratterizzata da tensioni agenti sulle superfici del difetto ipotizzato. Tali tensioni costituiscono la "driving force" per l'eventuale crescita del difetto stesso. A fini analitici le tensioni vengono classificate in:

- Primarie membranali: dovute al carico idrostatico del livello di liquido di ammoniaca (*Maximum Fluid Height, MFH*) e dalla pressione di progetto sovrastante il livello di liquido (*Pd*);
- Primarie flettenti: considerate nulle per la particolare condizione di carico e configurazioni analizzate;
- Secondarie membranali: dovute alle tensioni residue di saldatura;

- Secondarie flettenti: dovute alle tensioni residue di saldatura;
- Di picco: dovute alla discontinuità geometrica del piede di saldatura e definite attraverso un fattore di intensificazione degli sforzi, K.

Configuration	Longitudinal or circumferential joint	Parallel or transversal crack	Primary membrane stress	Primary bending stress	Secondary membrane stress	Secondary bending stress	Peak stress, K for weld toe geometry
A1	Longitudinal	Transversal	Pd	N/A	Longitudinal residual stress	N/A	1.00
B1 and C1	Longitudinal	Parallel	MFH+Pd	N/A	Transversal residual stress	Transversal residual stress	1.80
D1 and C1	Circumferential	Transversal	MFH+Pd	N/A	Longitudinal residual stress	N/A	1.00
E1	Circumferential	Parallel	Pd	N/A	Transversal residual stress	Transversal residual stress	1.80

Tabella 2 – Carichi da considerare per l'analisi delle tensioni per ogni configurazione di difetto

Qualche ulteriore precisazione si rende necessaria per le tensioni residue di saldatura. Le distribuzioni delle tensioni residue di saldatura vengono descritte in termini bidimensionali, lungo lo spessore delle virole del serbatoio e nel piano delle virole stesse. Le distribuzioni attraverso lo spessore delle tensioni residue di saldatura vengono espresse in funzione della profondità z a partire dalla superficie interna del serbatoio, secondo le equazioni (1), per le tensioni residue longitudinali, e (2) per le tensioni residue trasversali,

$$\sigma=\sigma_y \qquad (1)$$

$$\sigma=\sigma_y(0.9415-0.0319(z/B)-8.3394(z/B)^2+8.660(z/B)^3) \qquad (2)$$

dove σ_y è il valore massimo tra il carico di snervamento del materiale base (virole) e quello delle saldature (ricavato dalla qualifica di procedimento di saldatura), e B è lo spessore delle virole.

Per semplicità di implementazione le tensioni residue trasversali vengono linearizzate (Fig. 7).

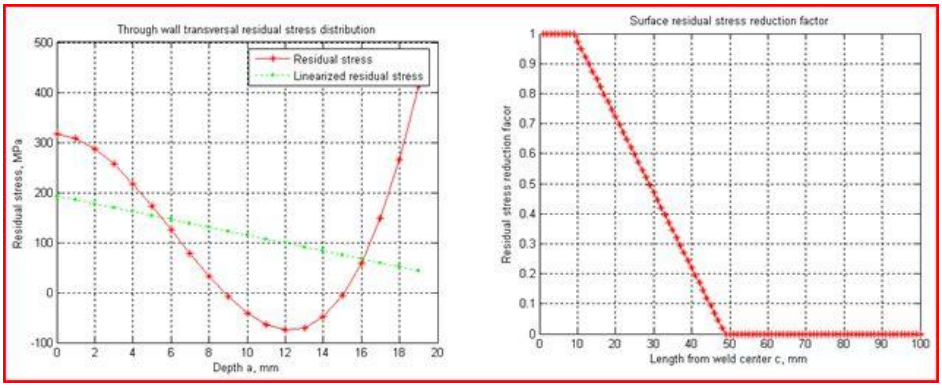


Fig. 7 – Distribuzioni delle tensioni residue di saldatura lungo lo spessore e nel piano

È evidente che le tensioni residue nel piano decrescono all'aumentare della distanza dell'apice del difetto dal giunto saldato: solo per le configurazioni di difetto perpendicolari al giunto saldato l'effetto di tale riduzione viene considerato applicando un fattore di riduzione (Fig. 7). Il fattore di riduzione viene calcolato considerando che la tensione residua decresce linearmente fino a ridursi a zero ad una distanza W+2B dal centro del cordone di saldatura, dove W è la larghezza del cordone e B è lo spessore delle virole.

In Fig. 7 vengono rappresentate la distribuzione delle tensioni residue di saldature trasversali e il fattore di riduzione in funzione della distanza dal centro del cordone di saldatura.

Infine, se il serbatoio è stato sottoposto a prova idraulica a pieno carico, l'effetto di rilassamento meccanico delle tensioni residue di saldatura si considera applicando un fattore di riduzione secondo formule indicate in BS7910 [3] e comunque non inferiore 0.85 (la riduzione massima consentita delle tensioni residue di saldatura dovuta alla prova idraulica è del 15%). Tale fattore si applica solo alle configurazioni di cricca longitudinali).

2.3 Caratterizzazione delle discontinuità

Prima della valutazioni in accettabili o non accettabili, le discontinuità lineari devono essere caratterizzate in lunghezza (2c), profondità (a), posizione (saldature longitudinali o circonferenziali; materiale base, zona termicamente alterata o zona fusa), orientamento rispetto al cordone di saldatura (α) e rispetto alla superficie (β). La Fig. 8 mostra la definizione degli angoli e delle misure necessarie alla caratterizzazione di una discontinuità.

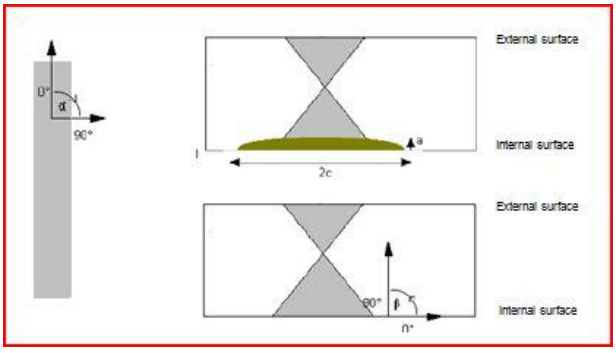


Fig. 8 – Definizione delle misure 2c, a, α e β per la caratterizzazione di una discontinuità lineare

Gli angoli α e β vengono utilizzati per proiettare le dimensioni 2c ed a lungo gli assi principali delle tensioni [3]. Sono queste proiezioni che vengono poi confrontate con i valori limite calcolati nell'analisi di integrità strutturale del serbatoio.

3. CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

La rottura di un serbatoio di stoccaggio ammoniaca può avere conseguenze potenzialmente catastrofiche dovute alla fuoriuscita di gas ammoniacali altamente tossici: per tale motivo vengono effettuate delle ispezioni secondo le linee guida dettate da *EFMA* in [2].

Il meccanismo di danneggiamento più pericoloso per questo tipo di apparecchiature è la tensocorrosione da ammoniaca (*Ammonia Stress Corrosion Cracking, NH3 SCC*): questo è un fenomeno molto lento che si può verificare solo in presenza di ossigeno e contenuto di acqua inferiore allo 0.2%; si manifesta sotto forma di cricche che, innescate dalla superficie interna del serbatoio, possono eventualmente propagare nella direzione dello spessore della membratura.

Come visto, parlando dell'analisi di integrità strutturale, cricche da NH3 SCC non pregiudicano necessariamente un esercizio in sicurezza dei serbatoi, purché rimangano entro i limiti di lunghezza e profondità critiche. È pertanto necessario disporre di tecniche di ispezione efficaci nel rilevare e dimensionare cricche da *NH3 SCC*.

Diverse sono le strategie ispettive utilizzate nell'industria per quest'applicazione:

- **Ispezioni interne.** Il CND più efficace nella rilevazione di *NH3 SCC*, avendo accesso alla superficie interna del serbatoio, è sicuramente quello magnetoscopico (MP). Tuttavia, nel processo di apertura, drenaggio e pulizia del serbatoio, si introduce ossigeno, aumentando significativamente il rischio di attivare od esaltare il fenomeno di NH3 SCC. La tendenza oggi diffusa è quindi quella di effettuare ispezioni non intrusive, ovvero che non richiedano l'apertura del serbatoio stesso;
- **Ispezioni non intrusive**. Al momento, La "Best Practice" relativa alle ispezioni non intrusive è la combinazione di tecniche basate sul metodo ad ultrasuoni per la localizzazione (UT *Phased Array*), ed il successivo dimensionamento delle discontinuità rilevate (UT *TOFD*). Questa combinazione è ormai ampiamente adottata e si è dimostrata particolarmente efficace nel rilevare e dimensionare discontinuità anche di piccola lunghezza (ben al di sotto di quella critica). Solo una percentuale (di solito limitata e non superiore al 30%) delle saldature longitudinali e circonferenziali della prima e seconda virola vengono solitamente ispezionate.

3.1. Emissione Acustica (AT)

Tra i metodi CND a carattere non intrusivo annoveriamo quello di Emissione Acustica (*Acoustic Emission*, AT).

L'obiettivo di un controllo AT è quello di fornire un'indicazione dell'integrità globale dell'attrezzatura. Il controllo viene tipicamente svolto utilizzando sensori piezoquarzo risonanti a 150 kHz. In sintesi, il metodo consiste nella rilevazione di onde transitorie associate al rilascio di energia elastica (Emissione Acustica) generate dal materiale per effetto dall'attivazione (evoluzione) delle discontinuità per condizioni di sollecitazione (carico) crescente.

Nel caso di prova su serbatoi atmosferici, le condizioni di carico crescente vengono realizzate semplicemente effettuando il riempimento progressivo del serbatoio con il fluido stesso. Per ovviare ai fenomeni di "memoria" del materiale (meglio noti come effetto *Kaiser*), la prova di Emissione Acustica così condotta implica un livello di riempimento del serbatoio oltre quello massimo conseguito nell'ultimo semestre di esercizio. Oltre a ciò, si agisce aumentando la pressione del vapore in equilibrio con il liquido in modo da intensificare, per quanto possibile e nei limiti consentiti, la tensione sulle pareti.

Per i serbatoi per ammoniaca a pressione atmosferica, tipicamente le procedure richiedono un minimo del 5% oltre il massimo carico precedentemente applicato. Si raccomanda pertanto di incrementare il carico fino al *Maximum Fill Height*, MFH (maggiore è la tensione indotta sulle pareti del serbatoio, maggiore è la probabilità di rilevazioni di indicazioni rilevanti).

Nello specifico, la procedura assunta è nota come "MONPAC" (*Monsanto Physical Acoustic Corporation*). Essa prevede che, una volta determinato il massimo livello di liquido nel serbatoio negli ultimi sei mesi, vengano in sequenza applicati carichi crescenti tra il 90% ed il 110% con incrementi discreti del 5 % (*load and hold*).

Risulta quindi evidente che, se il serbatoio è stato esercito al suo MFH negli ultimi 6 mesi, il controllo AT può essere effettuato solo dopo ulteriori 6 mesi di esercizio a carico ridotto almeno al 90% del *MFH*.

L'analisi dell'attività acustica registrata nel corso della prova viene quindi interpretata con specifici codici sviluppati e tarati sulla base di un'ampia attività sperimentale condotta su serbatoi di analoga tipologia costruttiva. A valle del processo di elaborazione, viene determinata la classe di pericolosità intrinseca del serbatoio (nella fattispecie articolata su cinque livelli: A, B, C, D, E).

La distribuzione a reticolo dei sensori di Emissione Acustica sulla membratura del serbatoio consente poi la localizzazione delle sorgenti attraverso l'applicazione di algoritmi di triangolazione basati sulla rilevazione dei ritardi temporali di acquisizione di uno stesso evento da parte dei sensori posti ai nodi di una stessa maglia. Questa ulteriore opportunità rende il metodo molto efficace per delimitare l'area acusticamente significativa (*cluster*) e poter concentrare su di essa ulteriori CND di dettaglio per i necessari riscontri.

La valutazione globale del serbatoio è comunque rimessa alla combinazione dei risultati emersi dal controllo AT e di quelli di dettaglio condotti con tecnica UT *TOFD*. Il controllo AT, infatti, non consente una caratterizzazione geometrica immediata della discontinuità attiva.

Non può comunque sfuggire la potenzialità del metodo AT che riduce drasticamente tempi e costi dei controlli, limitando quelli di dettaglio con UT alle sole zone d'interesse piuttosto che ad una estensiva, quanto inessenziale, loro applicazione. Una prova AT su serbatoi per ammoniaca viene generalmente eseguito entro le 48 ore ed è più che altro dipendente dalla disponibilità dell'ammoniaca. Allo stesso tempo, come già evidenziato, il metodo AT consente una verifica d'integrità strutturale globale del serbatoio e non limitata, come disposto dalla regolamentazione tecnica, al 30 % dello sviluppo lineare delle saldature longitudinali e circonferenziali della prima e seconda virola.

L'efficacia del controllo con metodo AT, specialmente per serbatoi adibiti al contenimento di ammoniaca è fortemente condizionata dalla idoneità a discriminare fenomeni di rumore di fondo (*noise*) da quelli di propagazione di discontinuità dovuti a meccanismi di *NH3 SCC*, data la loro tipica connotazione di debolezza in ampiezza del segnale acquisito.

Rimane il fatto che, in una logica fortemente conservativa, l'approccio AT non esclude a priori alcun meccanismo di attivazione della sorgente, ma, al contrario, evidenzia situazioni di instabilità per le quali è doveroso un riscontro oggettivo della esistenza di una discontinuità attiva mediante tecniche CND basate su metodi tradizionali (UT *Phased Array* ed UT *TOFD*), soprattutto in considerazione del fatto che i carichi di sollecitazione durante la prova AT sono assolutamente comparabili con quelli del normale esercizio dell'attrezzatura.

Di seguito, si riporta una lista di serbatoi ammoniaca a pressione atmosferica ispezionati con AT:

- Sterling Chemicals, Texas City, Texas, Tank dims. 70.5' H x 165' D, Dates tested: 1991, 1994, 1997, 2000, 2006 & due to test 2010
- Solutia Pensacola, Florida, Tank dims. 68' H x 60' D, Dates tested: 1995, 1998, & 2001, Re-analyzed AE results of 2001 test in 2009
- Monsanto Luling, Louisiana, Tank dims. 68' H x 60' D, Dates tested: 1999, 2002
- Phosphate Hill, Australia, Tank dims. 66' H x 72' D, Dates tested: 1999
- Orica Yarwin Plant, Australia, Tank dims. 120' H x 131' D, Dates tested: 2004
- Mosaic Faustina Plant, Donaldsonville, Louisiana, Tank dims. 98' H x 130' D, Dates tested: 2008
- PCS Nitrogen (Potlatch) Giesmar, Louisiana, Tank dims. 67' H x 144' D, Dates tested: 2009
- Mosaic Henderson Plant, Henderson, Kentucky, Tank dims. 85' H x 120' D, Dates tested: 2009 two tanks (East Tank & West Tank)
- (IMC) Kinder Morgan, Tampa, Florida, Tank dims. 105' H x 174' D, Dates tested: 2002, 2010

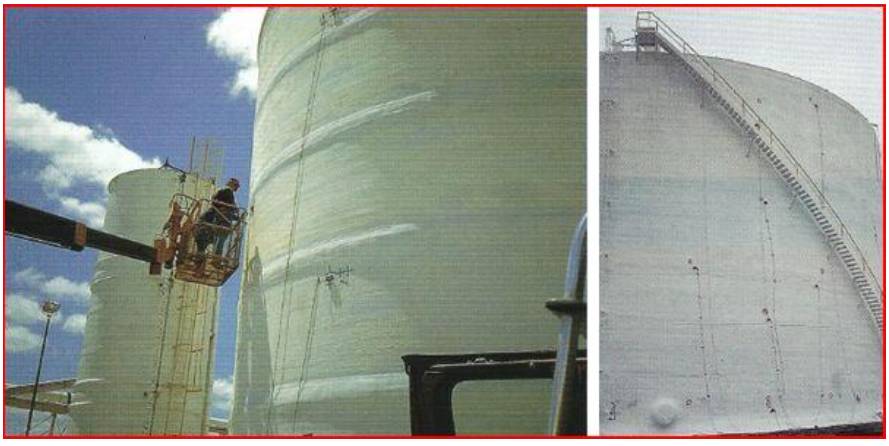


Fig. 09 – Viste di distribuzione a reticolo di sensori AT



Fig. 10 – Sensori AT istallati attraverso la coibentazione di un serbatoio di stoccaggio ammoniaca

In conclusione, l'applicazione di tecniche CND basate sul metodo AT risultano particolarmente vantaggiose per un approccio di *screening* di grandi serbatoi per ammoniaca a pressione atmosferica, orientando e meglio finalizzando ulteriori controlli di dettaglio per la caratterizzazione di sorgenti di Emissione Acustica la cui rilevanza non può ritenersi assolutamente trascurabile.

4. DEFINIZIONE DEL PIANO DI ISPEZIONE E MONITORAGGIO DEL SERBATOIO

Un piano di ispezione e monitoraggio del serbatoio può ora essere definito in funzione del confronto tra i risultati dell'analisi di integrità strutturale e la caratterizzazione mediante CND delle indicazioni rilevate.

In funzione di tale confronto 4 sono le possibilità:

1. Criterio di accettabilità soddisfatto. Non è richiesta un'ulteriore analisi. L'ispezione viene ripetuta entro un anno e, se nono viene riscontrata alcuna evoluzione della discontinuità, viene ripetuta ancora entro 3 anni. Ancora, se non viene riscontrata evoluzione della discontinuità si ritorna alle scadenze stabilite dalle linee guida dettate da *EFMA*;

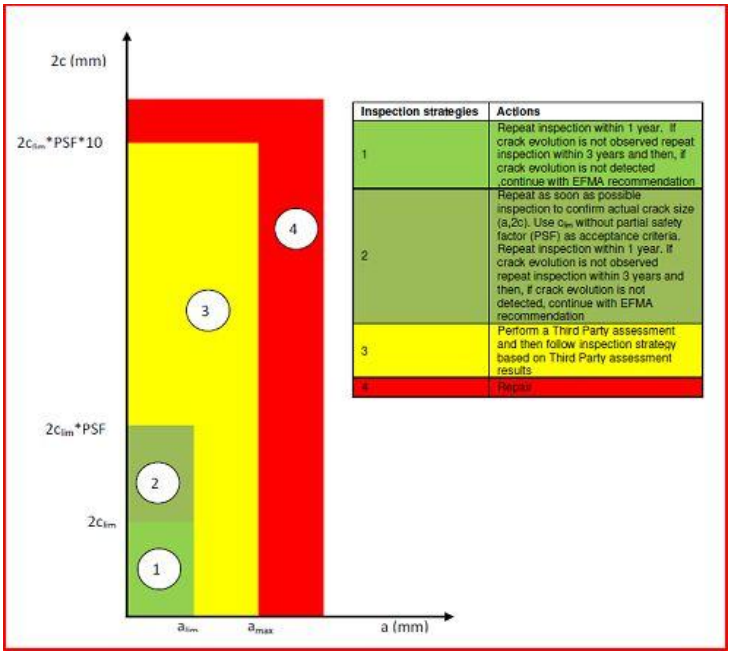


Fig. 11 – Definizione del piano di ispezione

2. Il criterio di accettabilità non è soddisfatto, tuttavia le dimensioni rilevate sono inferiori a quelle critiche senza il fattore di sicurezza (*Partial Safety Factor, PSF*=2.1). In questo caso non è necessaria un'ulteriore valutazione analitica ma si richiede di ripetere immediatamente l'ispezione per confermare con maggior accuratezza le dimensione reali della discontinuità. L'ispezione viene quindi ripetuta entro un anno e, se non viene riscontrata alcuna evoluzione della discontinuità, viene ripetuta ancora entro 3 anni. Ancora, se non viene riscontrata evoluzione del difetto si ritorna alle scadenze stabilite dalle linee guida dettate da *EFMA*;
3. Il criterio di accettabilità non è soddisfatto e le dimensioni rilevate sono superiori a quelle critiche anche senza il fattore di sicurezza (*Partial Safety Factor, PSF*=2.1). Tuttavia le dimensioni della discontinuità sono ancora tali che effettuando una nuova analisi, con ipotesi meno conservative sulle proprietà del materiali (approccio probabilistico) e sulle tensioni (analisi *FEM*), potrebbe ancora essere possibile accettare la discontinuità rilevata. Questo è il caso dei punti 5, 6 e 7 del processo ispettivo di un serbatoio di stoccaggio ammoniaca descritto al §1 di quest'articolo;
4. Il criterio di accettabilità non è soddisfatto e le dimensioni rilevate della discontinuità superano i valori critici calcolati, tanto che ulteriori analisi o ispezioni sarebbero comunque inutili. Ecco quindi che la discontinuità acquisisce la connotazione di un difetto e si raccomanda, pertanto, l'apertura e la riparazione del serbatoio.

La Fig. 11 illustra quanto sopra descritto.

BIBLIOGRAFIA

[1] Yara safe operating practice for ammonia storage, TECHNICAL AND OPERATIONAL STANDARD 3-02, 2008

[2] EFMA "GUIDANCE FOR INSPECTION OF ATMOSPHERIC, REFRIGERATED AMMONIA STORAGE TANKS", 2008

[3] BS7910:2005

[4] API 579-1/ASME FFS-1, JUNE 5, 2007 (API 579 SECOND EDITION)

[5] API Recommended Practice 579 Fitness For Service Jan, 2000 (API 579 FIRST EDITION)

[6] Assessment of critical crack dimensions in Ambes ammonia tank Report no/DNV Reg No.: 2009-3017/ 123S8N6-4 Rev 2, 2009-02-06

[7] QAFCO5, Ammonia Storage Tank, Surface Crack Size & Spills Evaporation Rate Estimations

[8] Report StatoilHydro Critical defect size calculations for ammonia tanks

[9] S.O. Angelsen and O.Y. Saugerud: "A probabilistic approach to ammonia pressure vessel integrity analysis", DNV Industry, Inc. Houston, Texas

[10] T.L. Anderson: "Fracture mechanics, fundamentals and applications, third edition"

sessione TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

Studio dell'applicabilità della tecnica ad onde guidate nell'ambito dei fluidi criogenici

F. Bertoncini* - M. Raugi* - F. Turcu*

** Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione - Università di Pisa.*

SOMMARIO

La prevenzione dei malfunzionamenti dovuti a corrosione e difetti nelle condutture è uno tra i problemi più importanti negli impianti industriali, in particolare per aziende petrolifere, chimiche e nella distribuzione del gas e di acqua.

In questa memoria è presentato uno studio di applicabilità della tecnica di ispezione non-distruttiva ad onde guidate negli impianti industriali in cui le condutture per il trasporto dei liquidi criogenici costituiscono una componente fondamentale. In particolare, oggetto di questo studio è il controllo dell'integrità delle condutture per il trasporto dei fluidi a temperature tra i -40 °C e i -196 °C.

Tra le varie industrie che utilizzano questo tipo di condutture si possono elencare i vari impianti petrol-chimici e per la produzione dei materiali plastici in particolare, i sistemi di refrigerazione e i sistemi di condutture per il trasporto dei gas liquefatti. In questo ultimo ambito il trasporto del GNL – Gas Naturale Liquefatto – è una componente significativa dell'impianto all'interno dei rigassificatori.

Come esempio di fluidi criogenici che trovano impiego nell'industria in processi di refrigerazione, o come combustibili, si hanno i seguenti gas per i quali è indicata la temperatura di ebollizione alla pressione atmosferica: ammoniaca (-33 °C), propano (noto anche come GPL) (-43 °C), anidride carbonica (-78.5 °C), GNL (-162 °C), l'ossigeno (-183 °C), l'azoto (-196 °C).

La memoria presenta alcune prove sperimentali realizzate con un sensore magnetostrittivo ad onde guidate alla temperatura di -80°C e di -196°C. L'obiettivo dello studio sperimentale è quello di verificare la possibilità di utilizzare sensori di tipo magnetostrittivo per l'ispezione/monitoraggio a lungo termine delle condutture per il trasporto dei liquidi criogenici.

1. ISPEZIONE E MONITORAGGIO DI CONDUTTURE CON LA TECNICA AD ONDE GUIDATE

Diversi metodi di ispezione non distruttiva possono essere applicati [1] nel controllo e nella verifica delle condutture di impianti industriali ed in particolare nelle raffinerie, negli impianti chimici e nella trasmissione e distribuzione del gas e del petrolio e prodotti derivati. Generalmente questi metodi, come ad esempio l'ispezione visiva, la perdita di flusso magnetico (MFL, Magnetic Flux Leakage), gli ultrasuoni, la radiografia, i liquidi penetranti sono tecniche di ispezione locali e possono essere applicati a condutture che sono direttamente accessibili. Ciò implica tempi lunghi per l'ispezione di lunghe condutture e, nel caso di impianti che usano tubature per il trasporto di gas liquido a temperature estremamente basse comporta la necessità di rimuovere il rivestimento ovvero l'isolante termico applicato alla tubatura. Come conseguenza, l'ispezione con tecniche di tipo locale comporta l'interruzione del ciclo produttivo con un incremento significativo dei costi per la sicurezza dell'impianto.

La tecnica ad onde guidate (GW, Guided Wave) è [2], [3], [5] una particolare tecnica non distruttiva in grado di verificare l'integrità della conduttura anche se, come spesso accade,

questa è inaccessibile perché interrata o posta sotto un rivestimento protettivo come il caso sopra considerato.

Le onde sono generate sottoforma di impulsi [4] da un sensore applicato localmente intorno alla conduttura da ispezionare e si propagano utilizzando la conduttura stessa come struttura guidante. In presenza di difetti dovuti a corrosione e/o a imperfezioni si genera un'onda riflessa che può essere rilevata da sensore stesso.

La tecnica permette di localizzare difetti lungo una conduttura fino a distanze dell'ordine delle decine di metri dal punto di accesso della conduttura e di discriminare, con metodi euristici, segnali dovuti a difetti da quelli prodotti da giunti, gomiti e supporti normalmente preseti in una conduttura.

Ad oggi, la tecnica GW [6], [7] si sta sempre più diffondendo nelle industrie e tra le aziende di servizi di diagnostica preventiva in quanto:

- fornisce rapidamente informazioni su un tratto relativamente lungo di conduttura utilizzando un solo punto di accesso alla conduttura stessa;
- richiede una minima preparazione per la sua implementazione;
- permette l'ispezione a distanza di aree remote altrimenti non raggiungibili o facilmente raggiungibili utilizzando tecniche di ispezione di tipo locale;
- riduce il costo di ispezioni quantitative con tecniche non distruttive convenzionali (NDT, Non Destructive Technique) poiché è in grado di indicare con esattezza i punti critici della conduttura che occorre ispezionare con tecniche puntuali;
- aumenta significativamente l'efficienza di ispezione.

Attualmente la ricerca sulla tecnica GW è orientata verso:

- l'identificazione e il riconoscimento dei difetti rilevati;
- applicazioni a temperature estremamente basse e d estremamente alte.

Ci sono due tecnologie per l'ispezione ad ode guidate basate su collari fatti di trasduttori piezoelettrici (PZT, Piezoelectric Transducer) o su trasduttori magnetostrittivi (MSS, Magnetostrictive Sensor). In questo lavoro l'attenzione è focalizzata sui sensori magnetostrittivi e sulle loro applicazioni a temperature estremamente basse.

2. SENSORI MAGNETOSTRITTIVI PER ONDE GUIDATE

2.1 Elementi base

I trasduttori MSS utilizzano l'effetto magnetostrittivo diretto e inverso che si verifica nei materiali ferromagnetici, [7], [8]. Il sensore magnetostrittivo è applicato localmente su una sezione della conduttura da ispezionare e consiste (cfr. Fig. 1) in strisce di materiale magnetostrittivo, come il nichel o il cobalto, incollate sul tubo e in bobine conduttrici avvolte intorno alle strisce magnetostrittive e connesse al generatore di segnale.

Le strisce di materiale magnetostrittivo sono inizialmente magnetizzate usando un campo magnetico statico prodotto da un magnete naturale. Il generatore di segnale invia l'impulso di eccitazione alla bobina di trasduzione che a sua volta induce una vibrazione nella striscia magnetostrittiva. Tale vibrazione si propaga come onda guidata lungo la conduttura. In particolare è possibile, agendo opportunamente sulla polarizzazione, innescare la propagazione dei due modi fondamentali di propagazione: modo torsionale T(0,1) oppure modo longitudinale L(0,1). Utilizzando due strisce di materiale magnetostrittivo e due bobine è inoltre possibile ottenere la propagazione dell'onda lungo una sola delle due possibili direzioni, rendendo trascurabile l'onda inviata nell'altra direzione.

La presenza di difetti dovuti a corrosione e/o a imperfezioni lungo la conduttura genera un'onda riflessa che può essere rilevata dallo stesso sensore che è stato usato in trasmissione. Ciò è possibile utilizzando l'effetto magnetostrittivo inverso: variazioni geometriche sulla striscia di nichel o cobalto modificano la permeabilità magnetica del materiale e sono in grado di indurre tensioni indotte. In questa fase il sistema di trasduzione acquisisce il segnale riflesso che, inviato al sistema di elaborazione, permette la localizzazione dei difetti presenti.

La Tab. 1 mostra le principali caratteristiche del sistema di diagnostica MsS2020® sviluppato dal SWRI (Southwest Research Institute), San Antonio, TX, USA e basato sulla tecnologia magnetostrittiva.



Fig. 1 – Strisce magnetostrittive e bobine applicate sulla conduttura ispezionata



Fig. 2 – Collare magnetostrittivo e multiplexer

Il sistema ha una buona sensitività, un intervallo di ispezione confrontabile con quello di altri sistemi e può essere facilmente utilizzato su condutture di differente diametro.

Un sensibile miglioramento [9], [10] delle capacità di diagnostica del sensore MSS può essere ottenuto utilizzando il collare di sensori magnetostrittivi mostrato in Fig. 2, sviluppato da DSEA (Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione), Università di Pisa, Italia. Il nuovo sistema permette l'estrazione della componente flessurale nel segnale acquisito e la conseguente discriminazione tra elementi simmetrici della conduttura (saldature, giunti, gomiti) da quelli non simmetrici (corrosione, tacche, crepe). Maggiori dettagli sulla identificazione dei difetti possono essere trovati in [11], [12].

Sensitività	2% della variazione della sezione trasversale ("*cross-sectional area*")
Frequenza	5 ÷ 250 kHz
Modo d'onda – Modalità di test	Torsionale e longitudinale - *Pulse-echo*/*Pitch-catch*
Dimensioni condutture	Testati tubi fino a 60 pollici di diametro, fino a 1pollice di spessore
Intervallo di ispezione	10 ÷ 120 m in ogni direzione; l'effettiva distanza di ispezione dipende dalla geometria della conduttura (diametro, spessore, numero di saldature, gomiti, diramazioni), dalla frequenza di ispezione e dallo stato della conduttura (conduttura in aria o interrata, rivestita o non rivestita)
Tempo richiesto per l'ispezione	Pochi minuti una volta che le strisce magnetostrittive sono state incollate.
Massima temperatura esterna della conduttura	Ad oggi le sonde MSS sono state usate fino a 65 °C; test su sonde per alte temperature (fino a 300 °C) sono stati eseguiti.
Installazione permanente del sensore	Possibile per il monitoraggio della conduttura

Tab. 1 – Principali caratteristiche del sistema di diagnostica MsS2020®

2.2 Monitoraggio di condutture rivestite

Il punto di forza della tecnologia MSS sta nella semplicità del sensore in termini di installazione e di adattabilità a differenti tipi e diametri di condutture. In più, nel caso di condutture rivestite come quelle termicamente isolate, l'ispezione può avere uno specifica configurazio-

ne che vede le strisce di materiale magnetostrittivo incollate al tubo, rivestite con materiale isolante sul quale sono poi poste le bobine trasducenti. In questo modo è possibile ripetere l'ispezione in periodi successivi o eseguire un monitoraggio continuo della conduttura senza dover ogni volta rimuovere il rivestimento visto che le strisce di nichel o cobalto rimangono permanentemente installate e l'accoppiamento magneto-meccanico tra strisce e bobine non richiede il contatto diretto tra le stesse. In particolare con il test mostrato in Fig. 3, relativo a un tubo da 10 pollici, lungo 12 m e rivestito in PE è stato mostrato che [11], [12] il segnale acquisito non cambia significativamente nei due seguenti casi:

a) acquisizione con le bobine direttamente poste sopra le strisce di nickel incollate al tubo e opportunamente magnetizzate;

b) acquisizione con il rivestimento tra le strisce e le bobine.

I risultati ottenuti mostrano 5 riflessioni dalla fine del tubo possono essere rilevate cosicché 60 m di conduttura possono essere monitorati lasciando la conduttura rivestita.

Ciò suggerisce la possibilità di:

- rimuovere un tratto corto (20 cm) di rivestimento della conduttura;
- incollare e magnetizzare le strisce;
- rivestire le strisce e quindi ripristinare il rivestimento della conduttura;
- misurare senza rimuovere il rivestimento, posizionando le bobine sopra il rivestimento, senza contato diretto con le strisce di materiale magnetostrittivo.

È importante sottolineare che questo tipo di monitoraggio è semplificato e reso possibile dal tipo di sensore utilizzato (le strisce magnetostrittive sono semplici, poco ingombranti e poco costose: spessore 0,25 mm, larghezza 25 mm se la frequenza utilizzata nel test è 32 kHz, costo 13 euro per la striscia utilizzata nel test.

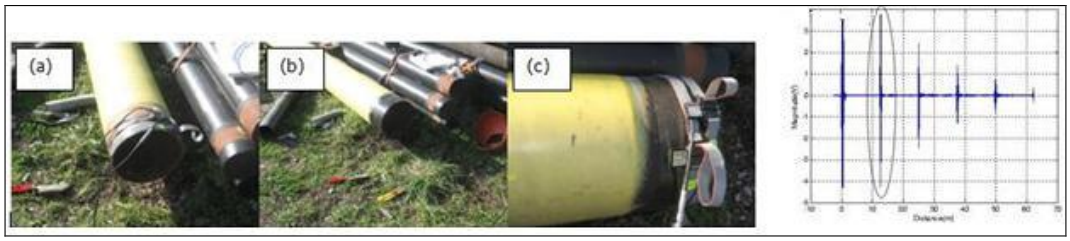


Fig. 3 – Test su conduttura rivestita in PE: (a) acquisizione senza rivestimento; (b) rivestimento della conduttura; (c) acquisizione con il rivestimento tra striscia e bobina; (d) risultati.

3. TEST DI SENSORI MAGNETOSTRITTIVI PER APPLICAZIONI A BASSA TEMPERATURA

È noto che i materiali magnetostrittivi possono operare a temperature più alte se confrontate con quelle dei sensori piezoelettrici, essendo i materiali magnetostrittivi limitati in questo dalla temperatura di Curie al di sopra della quale si perdono alcune proprietà magnetiche.

Per i limiti di temperatura inferiori fino ai quali i sensori magnetostrittivi possono lavorare ci sono studi teorici che predicono la possibilità di utilizzarli a temperature estremamente basse [13], [14]. Tuttavia, per nostra conoscenza, conferme sperimentali non sono ad oggi disponibili in letteratura.

In quanto segue test preliminari eseguiti rispettivamente a-80 °C e -196 °C mostrano che la tecnologia MSS può essere applicata anche quando le temperature sono estremamente basse.

3.1. Test a -80°C

Un particolare freezer è stato utilizzato per raffreddare un campione di tubo da 4 pollici di diametro fino a circa -80 °C (cfr. Fig. 4). Il campione era lungo 20 cm ed aveva le strisce di materiale magnetostrittivo già incollate. Il campione è stato lasciato nel freezer a -80 °C per più di

24 h nella prima fase e per più di 6 mesi durante la seconda fase dell'esperimento. Dopo circa 25 h a -80 °C le strisce magnetostrittive erano ancora incollate al tubo, pronto per il test.

In meno di 5 minuti dopo che il campione è stato tolto dal freezer, le bobine (protette dal freddo) sono state applicate sopra le strisce e i primi dati sono stati acquisiti. Nel segnale ottenuto è possibile osservare la prima riflessione e le successive riflessione dalla fine del tubo ogni 20 cm distanza corrispondente alla lunghezza del tubo.

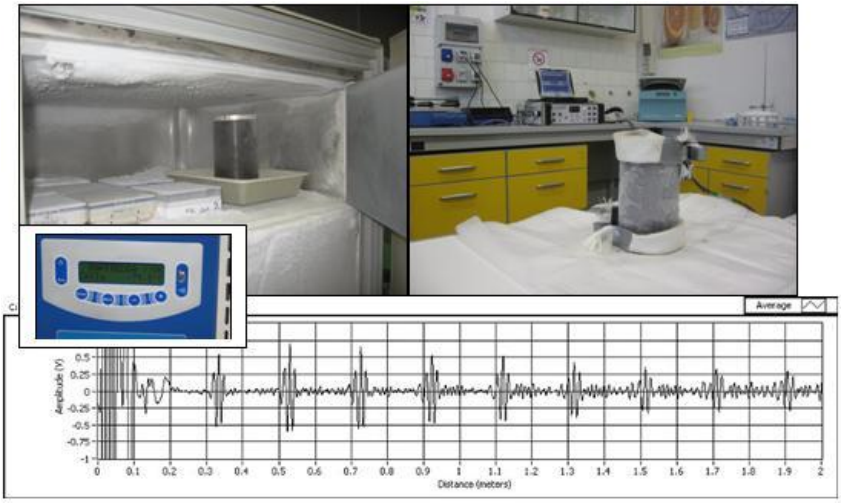


Fig. 4 – Test a -80 °C.

Ulteriori test sono stati eseguiti usando un altro campione di tubo con le stese dimensioni geometriche. Il tubo con le strisce di nichel incollate completo di bobine è stato tenuto nel freezer per 6 mesi: il segnale acquisito, questa volta lasciando dentro il freezer tubo e sensore, è risultato stabile anche dopo 6 mesi alla temperature di -80 °C.

3.2. Test a -196°C

Il test è stato eseguito immergendo in azoto liquido il campione di tubo già utilizzato per il test a -80 °C. Come mostrato in Fig. 5 il campione è stato tenuto parzialmente immerso nel liquido. Tuttavia, poiché i metalli sono buoni conduttori termici in questo esperimento la temperatura del sensore è stata considerata prossima a -196 °C, temperatura di ebollizione dell'azoto liquido alla pressione atmosferica. Il campione è stato monitorato per 12 ore ottenendo segnali stabili (cfr. Fig. 6) del tipo di quelli già acquisiti nel test a -80 °C.



Fig. 5 – Test a -196 °C: (a) riempimento del Dewar con azoto liquido; (b) pezzo di tubo e sensore magnetostrittivo parzialmente immerso in azoto liquido; (c) acquisizione dei dati.

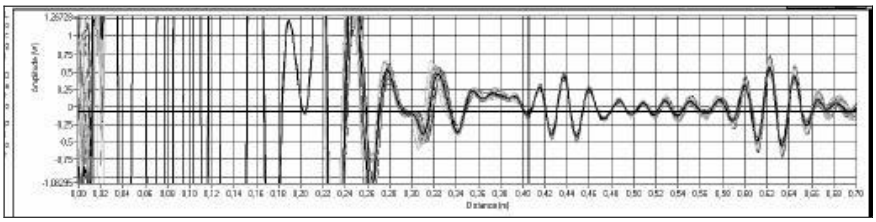


Fig. 6 – Test a -196 °C: signali acquisiti.

4. ULTERIORI SVILUPPI E APPLICAZIONI INDUSTRIALI

Gli esperimenti appena descritti sono il primo passo verso lo sviluppo di un sensore innovativo per il monitoraggio ad onde guidate di condutture. Il campo di applicazione è il controllo e la verifica dell'integrità delle condutture per il trasporto di fluidi criogenici a temperature inferiori a -30 °C. Tra le varie industrie che utilizzano questo tipo di condutture ci sono le industrie con sistemi di refrigerazione,

oppure i sistemi per il trasporto di gas liquefatti ed in particolare per il trasporto di gas naturale liquefatto (LNG, Liquefied Natural Gas) all'interno di impianti rigassificatori (cfr. Fig. 7).

La temperatura di ebollizione alla pressione di 1 bar di diversi gas usati nell'industria va dai -33 °C dell'ammoniaca o -43 °C per il propano (LPG, Liquid Petroleum Gas) fino ai -162 °C dell'LNG. Poiché la quasi totalità delle condutture che trasportano gas a queste temperature sono rivestite con materiali termicamente isolanti, tali condutture non possono essere visivamente ispezionate anche nel caso di corrosione esterna se il rivestimento non è tolto. Ciò è ovviamente estremamente costoso comportando necessariamente la fermata dell'impianto se questo è a ciclo continuo.

Pertanto una tecnica come quella ad onde guidate che permetta l'ispezione senza interrompere le normali operazioni produttive è fortemente innovativa. In questo ambito, tra le due esistenti tecnologie per onde guidate la tecnologia magnetostrittiva sembra essere la più promettente.

Al momento infatti i collari piezoelettrici presentano infatti una serie di limitazioni che non permettono la loro applicazione a condutture che trasportano fluidi a temperature estremamente basse. Tra queste limitazioni la più importante è che la temperatura limite di applicabilità dichiarata dal costruttore è di -40 °C [15]. In più c'è il fatto che il collare piezoelettrico deve essere applicato direttamente sulla conduttura da ispezionare e perciò il rivestimento nel punto di misura deve essere tolto ogni volta che si intende ispezionare la conduttura.



Fig. 7 – LNG Offshore, Porto Levante – Rovigo - Italia

Differente è il caso dei sensori magnetostrittivi [6], [12]: la striscia magnetostrittiva può essere applicata prima dell'inizio dell'attività produttiva dell'impianto o durante i periodi di fermo. Una volta applicata la striscia, questa può essere rivestita da un isolante termico e lasciata sulla conduttura durante il normale funzionamento dell'impianto stesso. La natura elettromagnetica del sensore permette infatti di posizionare le bobine che inducono e raccolgono il segnale a qualche centimetro dalla striscia magnetostrittiva posta a contatto con il tubo freddo sotto il rivestimento isolante termico. In più, di ovvia importanza, c'è il fatto che i componenti del sensore magnetostrittivo mostrano una buona resistenza alle bassissime temperature, così come evidenziato dai test eseguiti.

In questo modo è possibile eseguire ispezioni periodiche o pianificare un monitoraggio a lungo termine delle condutture senza dover rimuovere l'isolante termico senza dover perciò interrompere la normale attività dell'impianto.

5. CONCLUSIONI

La tecnologia ad onde guidate può essere applicata al controllo non distruttivo di tubi o condutture che non sono direttamente accessibili a causa della loro posizione o perche sono rivestiti. Normalmente la temperatura delle condutture ispezionate è superiore a 0 °C. L'applicazione della tecnologia GW è pertanto innovativa nel campo dei fluidi criogenici.

I buoni risultati dei test illustrati in questo lavoro possono portare un significativo contributo innovativo nel caso specifico del monitoraggio di condutture per il trasporto di fluidi a temperature inferiori a -40 °C. Al momento ciò è possibile solo con i sensori di tipo magnetostrittivo.

Il prototipo del nuovo sensore consiste di due parti: la striscia di materiale magnetostrittivo incollata intorno al tubo e una bobina disposta intorno alla striscia e sopra il rivestimento della conduttura. Questa peculiarità implica tempi di ispezione ridotti anche se le condutture sono relativamente lunghe. Inoltre, come nel caso di impianti che utilizzano condutture per il trasporto di gas liquidi a temperature estremamente basse, è necessario rimuovere l'isolante termico una sola volta prima dell'inizio dell'attività dell'impianto stesso o all'occasione di ispezioni periodiche quando la normale attività è temporaneamente fermata.

Una volta che la striscia magnetostrittiva è stata installata e il rivestimento ripristinato si può ispezionare la conduttura tutte le volte che si vuole, anche se l'impianto è in produzione.

6. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dipartimento di Patologia Animale, Profilassi e Igiene degli Alimenti dell'Università di Pisa e il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali per la collaborazione alla realizzazione dei test a temperature estremamente basse presentati in questo lavoro.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] J. Heerings, N. Trimborn, A. den Herder: "Inspection Effectiveness and its Effect on the Integrity of Pipework", Proceedings ECNDT 2006, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, September 25-29, 2006

[2] P. Mudge and P. Catton, "Monitoring of Engineering Assets using Ultrasonic Guided Waves", TWI, Cambridge, UK, ECNDT 2006, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, September 25-29, 2006.

[3] P. Cawley, D. Alleyene, "Practical Long Range Guided Wave Inspection - Managing Complexity", Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 22, 2003.

[4] D.N. Alleyne, B. Pavlakovic, Rapid Long range Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Waves, 15th WCNDT, Rome, 2000.

[5] H. Kwun, K. A. Bartels, "Magnetostrictive sensor technology and its applications," Ultrasonics, vol. 36, pp. 171–178, 1998.

[6] Glenn M. Light, Ph.D., Hegeon Kwun, Ph.D., Sang Y. Kim, Ph.D., and Albert Parvin, "Review paper on applications of magnetostrictive sensor technology", 4th Middle East NDT Con-

ference and Exhibition, Kingdom of Bahrain, Dec 2007.

[7] Hegeon Kwun, Sang-Young Kim, and Glenn M. Light, "Magnetostrictive Sensor Guided-Wave Probes for Structural Health Monitoring of Pipelines and Pressure Vessels", Sensor Systems and NDT Technology Department, Applied Physics Division, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, USA.

[8] F. Bertoncini, M. Raugi, Analysis of torsional guided waves for inspection of pipes, WSEAS Transactions on system,vol. 4,num. 11,pp 2001-2009,tot.pag 9,2005.

[9] F. Bertoncini, M. Raugi, F. Turcu, G. Acciani, G. Brunetti, G. Fornarelli, "Long Range Guided Wave Inspection of Pipelines by a new Local Magnetostrictive Transducer", Proceedings, IEEE Ultrasonics Symposium, New York, USA, October 2007.

[10] F. Bertoncini, M. Raugi, F. Turcu, Pipeline long-range inspection and monitoring by an innovative magnetic collar for magnetostrictive guided-wave systems, NDT.net - The e-Journal of Nondestructive Testing (December 2008).

[11] F. Bertoncini, C. Oprea, M. Raugi, F. Turcu, Defect identification by flexural component evaluation in guided wave monitoring of pipework using a magnetostrictive sensor, NDT.net - The e-Journal of Nondestructive Testing (September 2009).

[12] F. Bertoncini, C. Oprea, M. Raugi, F. Turcu, Diagnostica e monitoraggio di condutture ad onde guidate con un nuovo sensore magnetostrittivo: misura della componente flessurale e caratterizzazione dei difetti, Biennale PnD, Roma, Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive, 13° Congresso AIPnD, Roma, 14-15-16 ottobre 2009.

[13] J. D. Achenbach, Wave propagation in elastic solids, North-Holland/ American Elsevier, The Netherlands, 1975.

[14] Physical acoustic – principles and Methods, Edit by Warren P. Mason, Vol. I – Part A, Academic Press, 1964.

[15] http://www.guided-ultrasonics.com/en/?page_id=25.

sessione TEMATICA
INTEGRITÀ STRUTTURALE DI MATERIALI E COMPONENTI

Analisi e vita residua per piping soggetto a D.M. 329/04

*G. Calvano**
*A. De Musso***
**S.T.I.G.C. srl Ingegneria*
***I.S.P.E.S.L. Bari*

1. INTRODUZIONE

La direttiva comunitaria 97/23/CE denominata PED impone un nuovo approccio per la costruzione e l'esercizio delle attrezzature in pressione. I contenuti energetici ed i rischi specifici costituiscono i nuovi parametri progettuali. Le tubazioni con determinate caratteristiche d'esercizio, fluido, pressione, aventi diametri superiore a 3'' se contenenti fluidi pericolosi, sono da considerarsi come apparecchi in pressione e di conseguenza denunciate all'ISPESL.

Inoltre le tubazioni devono essere valutate nel loro stato di conservazione e efficienza , con monitoraggio secondo piani di controllo specifici per punti.

La S.T.I.G.C. srl che opera nel settore industriale da diversi anni, ha applicato le norme UNI e API per la valutazione dello stato di conservazione della linee di diversi stabilimenti.

La linea è stata individuata fisicamente e riqualificata secondo il D.Lgs. 93/00.

Sono state eseguite prove di dettaglio (ultrasuoni), considerando le percentuali dei campioni dettate dalla stessa normativa.

L'analisi dei punti è stata effettuata, cosi come proposto dalle UNI , secondo un modello stocastico, calcolando lo spessore medio e lo spessore minimo atteso (correlato in maniera diretta al tipo di fluido) della linea. Dal raffronto delle singole misure, allo spessore minimo atteso e medio, si è redatto il piano di controllo della tubazione, con le relative indagini di screeneg e dettaglio da effettuare negli anni.

Seguendo la norma API, in funzione del tipo di materiale e di schedula adottato nella fase di realizzazione del piping, confrontando gli spessori attuali a quelli di progetto, in relazione degli anni di esercizio, sono stati ricavati l'indice di corrosione sia "short term" che "long term".

La vita residua della tubazione è stata ottenuta attraverso la linearizzazione degli indici con lo spessore minimo atteso.

2. RIQUALIFICAZIONE

L'attività di riqualificazione è stata supportata da un prima fase di censimento degli asset, con una seconda fase di studio dei parametri d'esercizio e progettuali, al fine di valutarne una classe di appartenenza in funzione del fluido.

Sono stati effettuati dei controlli di screening e di dettaglio, cercando di attenersi alle percentuali di verifica imposta dalla UNI 11325. Sono state necessariamente utilizzate metodologie di rintracciabilità univoca del singolo punto di verifica, cosi da monitorare in maniera continua nel tempo l'evoluzione di spessori e danni, seguendo le innovative concezioni degli standard TPM per valutare l'efficienza degli asset, la disponibilità, l'affidabilità, la sicurezza e la qualità.



Fig.1 :Scheda riepilogativa Riqualificazione Apparecchiatura a Pressione



Fig.2 :Scheda riepilogativa Rintracciabilità CND

3. ANALISI

Le attività di monitoraggio, sono state analizzare secondo la norma UNI 11325, seguendo una distribuzione dei dati di tipo "gaussiano", siamo andati a calcolare un valore medio e minimo dello spessore della tubazione, andando a considerare quali di queste erano nei diversi "range" d'accettabilità, correlando il fluido alla varianza media standard, cosi da avere una modellizzazione quanto più consona alla realtà.

In funzione della "distribuzione" degli spessori, in riferimento al valore minimo, si è dato un esito al controllo, andando a redigere un piano di controllo per monitorare l'evoluzione dei fenomeni corrosivi e valutare la sicurezza e l'affidabilità dell'apparecchiatura.

Calcolo spessore minimo		
Formula	**Valore**	**Commento**
Sm= Som i / N	7,3572	Valore medio degli N spessori SECONDO UNI 11325 C.4.3.4
N	25	N° Punti di verifica
N^-1/2	0,2	ELEMENTO DI VERIFICA CALCOLO
ð	0,55433217	DISPERSIONE SECONDO UNI 11325 C.4.3.4
Θ= ð*N^-1/2	0,11086643	VARIANAZA MEDIA STANDARD
Sc=Sm-3Θ (GRUPPO 1)	7,0246007	SPESSORE MINIMO SECONDO UNI 11325 C.4.3.4

Fig.3 :Calcolo dei valori secondo UNI 11325

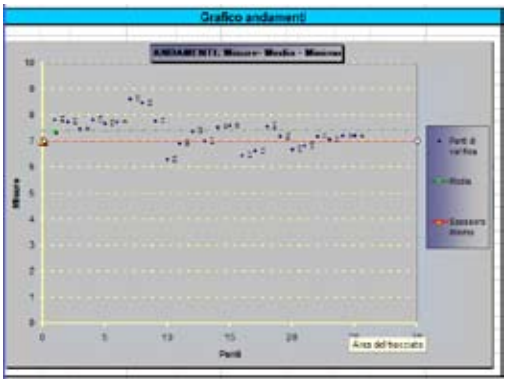


Fig.4 :Grafico Andamenti Spessori

4. CALCOLO DELLA VITA RESIDUA

Seguendo la norma API, in funzione del tipo di materiale e di schedula adottato nella fase di realizzazione del piping, confrontando gli spessori attuali a quelli di progetto, in relazione degli anni di esercizio, sono stati ricavati l'indice di corrosione sia "short term" che "long term".

La vita residua della tubazione è stata ottenuta attraverso la linearizzazione degli indici con lo spessore minimo atteso.

Analisi Esito dei Controlli			Piani di Controllo					
PUNTI	SPESSORE IN MM	ESITO DEL CONTROLLO	2010	2011	2012	2013	2014	2015
A 1	7,82	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
A 2	7,73	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
B	7,47	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
C 1	7,83	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
C 2	7,69	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
D	7,74	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
E 1	8,61	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
E 2	8,48	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
F 1	7,77	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
F 2	6,3	NEGATIVO *	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio
G 1	6,93	NEGATIVO *	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio
G 2	7,4	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
H 1	7	NEGATIVO *	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio
I 1	7,54	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
I 2	7,59	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
L 1	6,45	NEGATIVO *	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio
L 2	6,62	NEGATIVO *	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio
M 1	7,58	POSITIVO	Positivo	Screening	Positivo	Screening	Screening	Screening
M 2	7,18	POSITIVO	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio
K 1	6,7	NEGATIVO *	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio
K 2	6,83	NEGATIVO *	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio	Dettaglio
Z 1	7,18	POSITIVO	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio
Z 2	7,06	POSITIVO	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio
O	7,21	POSITIVO	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio
P	7,22	POSITIVO	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio	Screening	Dettaglio
		*Necessita verifica annuale						

Fig.5 : Scheda riepilogativa Esito e Piano dei controlli



Fig.6 : Scheda Riepilogativa Calcolo della vita residua

5. BIBLIOGRAFIA

- Direttiva PED
- Norme ANCC
- D.M. 329/04
- Circolare ISPESL del 10/11/2008
- Norme UNI/TS 11325-1
- Norme API 510/03
- D.Lgs. 81/2008
- D.Lgs. n. 106 del 3 agosto 2009

Iter di individuazione delle criticità e studio di un processo svolto in un reattore chimico finalizzati al raggiungimento di elevati standard di sicurezza

G. Mari - R. Lauri**
*C. Metaponte***
*V. Romani****
**ISPESL, DIPIA*
***Facoltà di Farmacia, Università di Roma "La Sapienza"*
****Biosint - Sermoneta (LT)*

SOMMARIO

Un'applicazione industriale di un'alchilazione, necessaria per l'ottenimento di una benzodiazepina derivata, usata come ansiolitico, sarà l'oggetto del seguente articolo. La reazione mostra vari motivi di interesse sia dal punto di vista del suo svolgimento che dal punto di vista impiantistico. In particolare verrà evidenziato come si siano dovuti considerare svariati aspetti relativi alla sicurezza del processo e dell'impianto. Per fare solo alcuni esempi, verrà mostrato come si è dovuto gestire lo sviluppo di ammoniaca gassosa nel reattore, come si è dovuto procedere nella distruzione della Litio ammide residua (composto, questo, molto reattivo) e come si sia dovuto procedere col dosaggio dei due componenti in maniera assolutamente graduale e controllata. Il caso preso in esame vuole rappresentare un esempio di come sia possibile condurre a termine applicazioni industriali di processi complessi seguendo il giusto iter di studio dello stesso. Si vedrà come sia stata approfondita sia la chimica della reazione che le capacità tecniche dell'impianto, che permette di realizzare il prodotto. Ovviamente tutto quanto precedentemente riportato viene svolto ponendo l'attenzione ai problemi di sicurezza e ambiente.

1. DESCRIZIONE DEL PROCESSO: FASI DELLA REAZIONE CHIMICA

Nel processo esaminato si attua una reazione chimica di alchilazione di substrati amminici, che chiameremo per brevità (e per riservatezza) "A" e "B" , dei quali si riporta la formula di struttura in Fig. 1. Ai gruppi rappresentati con Rn corrispondono uno o più gruppi alchilici (CH_n), mentre ai gruppi Phn corrispondono anelli fenilici con eventuali sostituzioni le quali, però, non prendono parte alla reazione.

Il composto "A" si trova nella forma "cloridrata" e richiede, prima della reazione principale, una preparazione del medesimo come "Base". Ciò avviene mediante il suo trattamento con una base "forte" (soluzione di soda caustica), che rimuove il gruppo HCl dalla molecola, formando cloruro di sodio (NaCl) e rendendo così la molecola non più solubile in acqua, bensì in un solvente organico aromatico infiammabile. Il composto "B", invece, (quello con gli anelli fenilici) non richiede nessun trattamento preliminare ed è già solubile nel medesimo solvente organico. La particolarità di questi due composti è che essi non reagiscono tra loro (pur essendo disciolti nello stesso solvente), se non con l'ausilio della Litioammide ($LiNH_2$), che funge da catalizzatore agendo sul Cloro del composto "A" e sul gruppo amminico del composto "B". Lo schema della reazione è rappresentato in Fig. 2. L'alchilazione dà vita al composto "C", che costituisce la base del prodotto che si vuole ottenere. Durante la reazione si forma Cloruro di Litio (LiCl) ed ammoniaca gassosa (NH_3) che co-

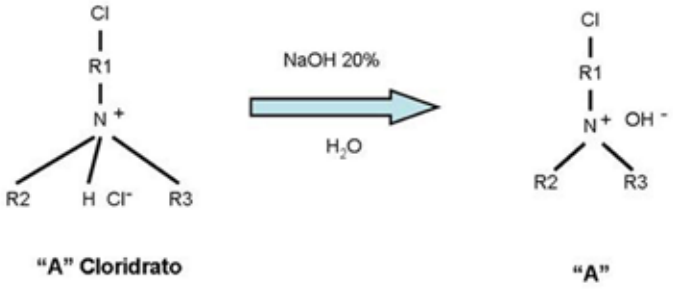


Fig. 1 – Formule di struttura

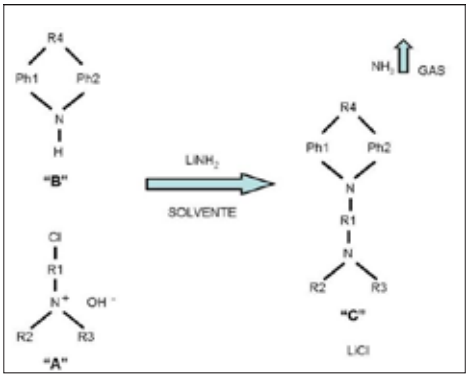


Fig. 2 – Schema della reazione

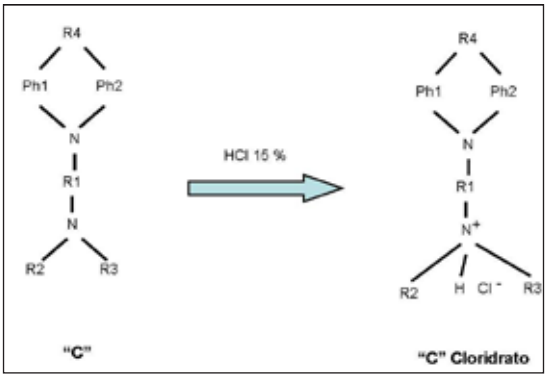


Fig. 3 – Trasformazione della Base "C" nella forma cloridrata

stituirà uno dei vari problemi di sicurezza da gestire e che saranno meglio dettagliati in seguito.

Basterà ora trattare la base "C" così ottenuta con acido cloridrico per passare alla forma "Cloridrata", solubile in acqua, che costituisce il principio attivo di nostro interesse. La Fig. 3 rappresenta quest'ultima trasformazione chimica.

1.1. Prove calorimetriche

La reazione "principale" di alchilazione è stata oggetto di uno studio preliminare mediante calorimetro di reazione, per mezzo del quale è stato possibile simulare il processo industriale con quantità sufficientemente significative [1] (dell'ordine dei 2 litri). Sul calorimetro è stato possibile anche installare un sistema di condensazione dei vapori ed un sistema di successivo abbattimento dell'ammoniaca gassosa, che sfugge alla condensazione, mediante soluzione di acido solforico.

A valle della reazione di alchilazione è stato inoltre possibile effettuare una prova di eliminazione della litioammide residua, mediante aggiunta di acqua, la quale innesca una reazione che si è rivelata abbastanza critica e, comunque, da tenere sotto attento controllo. Le prove calorimetriche hanno permesso di ottimizzare i parametri della reazione come ad esempio: 1) la temperatura a cui condurre il processo; 2) l'eccesso di catalizzatore ($LiNH_2$); 3) l'eccesso di uno dei due composti ("A" nel ns. caso); 4) il tempo di reazione; 5) la portata di ammoniaca che si sviluppa e che, quindi, deve essere abbattuta.

In particolare, come verrà confermato in seguito, si è deciso di alimentare la miscela di "A" e "B" (che, da soli, non reagiscono) nel calorimetro ove si trovava già il catalizzatore, sciolto nel solvente. Sono state effettuate 14 aggiunte di miscela "A"+"B" da 100 ml ciascuna per un totale di 1400 ml. Ogni aggiunta (avente durata di 2 minuti) è intervallata di mezz'ora rispetto alla precedente. In seguito ai risultati ottenuti, si è deciso, poi, di alimentare in impianto in continuo, la miscela reagente in modo da impiegare un tempo decisamente più breve (4 ÷ 5 ore), invece

delle oltre 7 ore richieste dall'esperimento. Nella miscela reagente sono state preparate 1.68 moli del composto "B" (corrispondenti a 387 g) e 2.15 moli del composto "A" (corrispondenti a 340 g). In tal modo si è alimentato un eccesso di "A" del 28% che si è deciso di mantenere anche nell'applicazione industriale. Lo stesso eccesso del 28% è stato impiegato anche per il catalizzatore che, come detto, si trovava già nel reattore RC1. Ad ognuna delle 14 aggiunte di miscela "A"+"B" sono stati prelevati dei campioni che hanno permesso di valutare la scomparsa dei reagenti ed il corrispondente ottenimento del prodotto "C". I campioni sono stati sottoposti ad analisi. Inoltre, grazie alla simulazione del sistema di abbattimento dell'ammoniaca gassosa, che si forma durante la reazione, è stato possibile quantificare l'entità del rilascio di NH_3, che garantisce il giusto procedere della reazione. Tuttavia, l'aspetto più interessante dell'utilizzo del calorimetro di reazione è quello che ha permesso di ottimizzare la temperatura di conduzione della reazione in base a considerazioni ottenute dai grafici di temperatura e di bilancio termico che tale strumento è in grado di fornire. La prova è stata condotta a 110 °C che corrisponde alla temperatura di ebollizione del solvente. Il solvente veniva condensato e fatto ricadere nel reattore. Si è visto subito che la debole esotermicità della reazione di alchilazione era dello stesso ordine di grandezza del calore sottratto dall'aggiunta della miscela reagente relativamente "fredda" (20°C contro i 110°C del batch). La strumentazione installata sul calorimetro di reazione è in grado di calcolare il calore sviluppato dalla reazione (in questo caso esotermica), "depurando" il dato dal calore fornito dall'agitatore, dal calore sottratto dall'aggiunta della miscela "fredda" ed, infine, correggendo ulteriormente il dato tenendo conto delle dispersioni di calore verso l'ambiente esterno. Questi valori si attestavano, per la prima aggiunta di 100 ml di soluzione "A"+"B" a circa 12 kJ/kg (di soluzione aggiunta), che corrispondevano a meno di 8°C di innalzamento adiabatico del batch. Il calore specifico della massa di reazione era costantemente valutato in 1535 kJ/kg K. Già solamente alla terza aggiunta di miscela reagente i valori del calore sviluppato scendevano a 6,7 kJ/kg con un salto termico di poco più di 4°C. Valori, quindi, quasi dimezzati rispetto all'aggiunta di un'ora prima (si ricorda che avveniva un'aggiunta ogni mezz'ora). Lo sviluppo di calore andava via via scemando nel corso dell'esperimento a causa della sempre maggiore presenza del prodotto nel batch a scapito del catalizzatore. Un importante elemento, che però il calorimetro non può calcolare, è il calore sottratto alla massa di reazione dall'evaporazione del solvente che ricade, poi, più freddo nel reattore stesso. Un ulteriore contributo "negativo" all'innalzamento termico della massa contenuta nel reattore, che non è stato possibile simulare nel calorimetro di reazione (ma che è presente nell'applicazione industriale) è dato dalla portata di azoto gassoso insufflata nel reattore allo scopo di favorire l'allontanamento dell'ammoniaca, che si viene a formare. Tuttavia è stato calcolato che l'effetto di raffreddamento dell'azoto è di entità poco rilevante. A questo punto, prima di passare alla descrizione della fase di eliminazione del catalizzatore residuo, anch'essa simulata nel calorimetro, appare opportuno evidenziare come la prova della reazione condotta col calorimetro di reazione abbia permesso di prendere un'importante decisione sulla temperatura di conduzione della reazione stessa. Infatti è stato deciso di effettuare la produzione industriale a 80°C e non ai 110°C della prova. Questo per una serie di motivi [2]:

- la cinetica di reazione è risultata ottimizzata nell'evitare la formazione di prodotti secondari indesiderati;
- la pressione all'interno del reattore risulta inferiore;
- vi è meno evaporazione di solvente con conseguente minore utilizzo di energia;
- l'inferiore utilizzo di energia si ripercuote anche nei condensatori;
- la temperatura dell'olio siliconico della camicia del reattore circola ad una temperatura inferiore con conseguenti vantaggi in termini di sicurezza.

Le considerazioni appena esposte, unitamente ai dati forniti dalla prova calorimetrica, hanno permesso di effettuare un bilancio termico e di massa sufficientemente preciso da individuare un reattore già esistente come idoneo ad ospitare il processo di alchilazione, oggetto del presente studio. Al suddetto reattore sono state applicate alcune modifiche di cui si dirà in seguito per adattarlo perfettamente alla produzione del principio attivo di interesse. Come accennato, la descrizione della prova calorimetrica non sarebbe completa se non comprendesse le importanti deduzioni che sono emerse dalla simulazione del processo di distruzione della litioammide

(il ns catalizzatore). La reazione della litioammide ($LiNH_2$) residua (circa il 28%, come detto) avviene con acqua per formare idrossido di Litio (LiOH) ed ulteriore ammoniaca gassosa [3]. Tale reazione si è rivelata molto più esotermica della stessa alchilazione. Dall'integrazione, possibile con il calorimetro RC1, della prima aggiunta di 100 g di acqua (a temperatura ambiente) alla massa di prodotto (nel frattempo anch'essa raffreddata) si è dedotto uno sviluppo di calore di oltre 53 kJ/kg (di acqua), con un innalzamento termico adiabatico di 34.6°C. Tali valori sono oltre 4 volte superiori alle prime aggiunte di miscela reagente "A"+"B" nella precedente reazione di alchilazione. Il fatto di avere condotto la prova con quantità apprezzabili di materia in tutte le varie fasi del processo (comprendente diverse reazioni) ha permesso di individuare alcune criticità importanti del processo come ad esempio la necessità di dosare molto lentamente l'acqua necessaria per la conversione del catalizzatore residuo. Tale necessità deriva da ben tre motivi: 1) la litio ammide si trova dispersa nel solvente ed il suo contatto con l'acqua è molto lento trovandosi in due fasi diverse; 2) la reazione è esotermica ed è bene che si sviluppi lentamente; 3) l'ammoniaca, che si libera, deve essere indirizzata ad un impianto di conversione, che è di tipo "continuo" ed è bene quindi procedere con portate il più possibile costanti, evitando "picchi". I dati raccolti nelle prove calorimetriche effettuate hanno, quindi, permesso di potere procedere nella fase di sviluppo industriale con un'adeguata conoscenza del processo e, di conseguenza, mantenere elevati gli standards di sicurezza di qualità e ambientali.

2. PROCESSO INDUSTRIALE

Fase di processo	**Note**	**Materiale movimentato**	**Sfiato**	**T °C**	**pressione**
Polmonazione	-	Azoto gassoso	Aria	Amb	Atm
Carico acqua demi	-	200 lt	-	+ 4	Atm
Carico di "A" cloridrato	-	170 kg (polvere)	-	+4	Atm
Carico soda 20%	-	300 lt	-	+4	Atm
Conversione di "A" in "base"	"A" rimane in sospensione		-		
Carico solvente	"A" si scioglie nel solvente	700 kg	-	+4	Atm
Separazione per decantazione		Allontanata fase acquosa	-		
1° lavaggio	Alimentata e poi separata acqua demi	300 lt	-	+4	Atm
2° lavaggio	Alimentata e poi separata acqua demi	300 lt	-	+4	Atm
Distillazione del solvente	per rimuovere l'acqua disciolta	Allontanata acqua fino a KF 0.1%	Solvente condensato "a ricadere"	+45	-900 mmHg
Carico "B"		200 kg	-	+4	Atm
Spostamento "A"+"B"	"A"+"B" inviati ad altro serbatoio	1200 lt	-		
Carico solvente anidro		400 lt	-	+4	Atm
Carico $LiNH_2$	Catalizzatore	25 kg	-	+4	Atm
Alimentazione miscela reagente	Reazione di alchilazione	1200 lt @ 300 lt/h	NH_3 a abbattimento (solvente condensato)	+80	Atm
Conversione Litio ammide in eccesso	Formazione di LiOH e NH_3	Acqua demi 150 litri @ 50 lt/h	NH_3 a abbattimento	+50	Atm
1° Lavaggio Sali	I sali passano nella fase acquosa	Acqua demi 150 lt	-	+50	Atm
1° Eliminazione fase acquosa		Acqua 300 lt		+30	Atm
2° Lavaggio Sali	Ulteriore lavaggio	Acqua demi 300 lt	-	+30	Atm
2° Eliminazione fase acquosa		Acqua 300 lt		+30	Atm
Inizio distillazione eccesso di "A"	Eliminazione eccesso "A"	Solvente e "A"	Solvente e "A" condensati e allontanati	+50	60 mmHg assoluti
Fine distillazione eccesso di "A"	"curva" precisa di pressione	Solvente e "A"	Solvente+"A" condensati e allontanati	+70	5 mmHg assoluti
Conversione "C"	"C" diventa cloridrato e passa in fase acquosa	Acqua demi 160 lt HCl 15%	-	+25	Atm
Separazione fase acquosa	Decantazione, filtrazione ottenimento prodotto	Fase acquosa con prodotto (250 kg)	-	+25	Atm

Tabella 1 – Fasi del processo

2.1. Preparazione del reagente “A”

Come già illustrato, il composto “A” si trova nella forma “cloridrata”, solubile in acqua, e la sua preparazione come “Base” avviene mediante trattamento con una base “forte” (soluzione di idrossido di sodio al 20%), che rimuove il gruppo HCl dalla molecola formando cloruro di sodio (NaCl) [4]. A questo punto la molecola, non più solubile in acqua, forma una sospensione. Dal punto di vista strettamente “chimico” non accade più nulla in questo step in quanto il successivo cambio di fluido dall’acqua al solvente organico e la dissoluzione del composto “B” nel solvente stesso non provocano alcun cambiamento nelle molecole del processo. Si ricorda, infatti, che “A” e “B” non sono in grado di reagire se non in presenza del catalizzatore.

2.2. Preparazione della miscela reagente: caratteristiche dell’impianto

Il reattore utilizzato nel processo ha una capacità di 3.5 m^3, è del tipo “smaltato” ed è dotato di agitatore (anch’esso smaltato) e camicia di termostatazione. La suddetta camicia di termostatazione è assistita da un sofisticato sistema di circolazione di olio siliconico che attraversa ben 4 scambiatori (sia di riscaldamento che di raffreddamento), fornendo così una grande flessibilità operativa ed una notevole potenza termica. Gli scambiatori sono (procedendo dall’uscita della camicia): ad aria ad alette (per un primo raffreddamento); ad acqua di torre a +25°C; ad acqua e glicole a -5°C; ad olio diatermico a 120°C (per il riscaldamento) [5]. Tutti gli scambiatori sono dotati di bypass automatico a seconda delle esigenze del processo. La scelta dell’olio siliconico (ad esempio in alternativa all’acqua e glicole) garantisce inoltre un’ulteriore sicurezza anche in caso di contatto indesiderato tra il mezzo refrigerante ed i fluidi di processo, che contengono, per buona parte della lavorazione la Litio ammide, che (come già ricordato) reagisce violentemente con l’acqua. Lo schema dell’impianto è rappresentato in Fig. 4

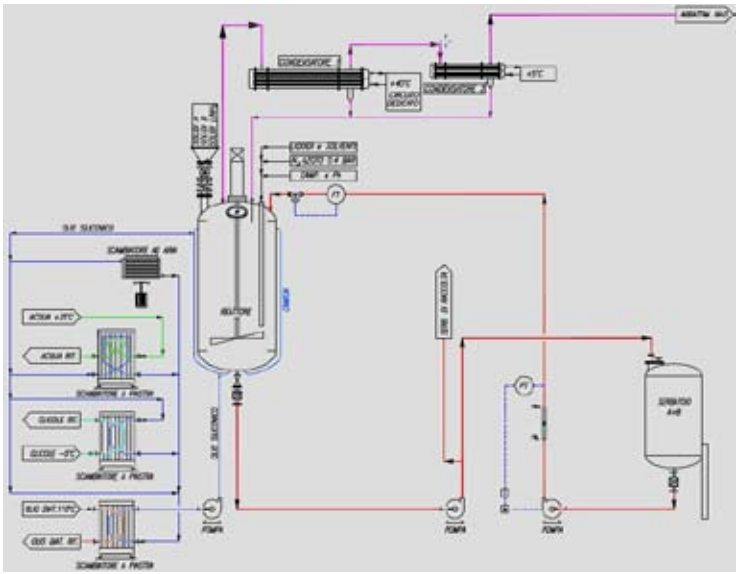


Fig. 4 – Schema dell’impianto

Tra le particolarità impiantistiche del reattore quelle che interessano, già nella fase di preparazione della miscela reagente, sono le seguenti:

- il reattore è dotato di un sistema di carico dei solidi (con tramoggia e rotocella flussata con azoto), che permette di caricare qualche centinaio di kg di solido in tempi ragionevoli senza dovere aprire il reattore e conseguendo un notevole vantaggio in termini di sicurezza e di consumo di azoto;
- il frangiflutti (elemento sempre molto critico nei reattori smaltati) ha una sezione molto

particolare (simile ad una "C" con la parte concava rivolta verso il flusso rotatorio indotto dall'agitatore) ed è in grado di ospitare all'interno della sua parte concava vari tubi di teflon con diverse funzioni, tra cui la presa e la mandata di un sistema di campionamento e misura del pH, un soffiaggio di azoto e 2 sonde di temperatura. La forma del frangiflutti è appositamente studiata per favorire la formazione di sospensioni (situazione molto comune in questo processo). Il sistema di campionamento e il pH-metro sono assistiti da una pompa a doppia membrana, posta al di sopra della testa del reattore stesso. La sicurezza dell'operatore, che effettua il campionamento, è garantita da una serie di valvole e meccanismi;

- subito a valle della valvola di fondo del reattore è installata una spia visiva, che permette di individuare quale fase si stia scaricando in quel preciso momento, facilitando, così, la separazione di fasi diverse.

Il primo step del processo consiste nella polmonazione del reattore con azoto, operazione che verrà mantenuta per tutta la durata della produzione a causa della presenza del solvente aromatico infiammabile e della presenza di prodotti caricati sotto forma di polvere. Dopo avere preparato un fondo di acqua demineralizzata di 200 litri si procede col carico di 170 kg di "A" cloridrato mediante il sistema a rotocella descritto in precedenza. Il composto "A" cloridrato si scioglie facilmente in acqua formando una soluzione alla quale viene aggiunta una soluzione di 300 litri di soda caustica al 20%. Avviene a questo punto la reazione, che trasforma il prodotto "A" in una base e lascia il prodotto in sospensione, mentre il cloruro di sodio formatosi rimane in soluzione acquosa. In questo step si sfrutta a pieno la capacità di mantenere facilmente in sospensione il prodotto da parte del sistema di agitazione appositamente studiato. Il successivo carico di 700 kg di solvente determina la formazione 2 fasi finemente sospese e il passaggio graduale del prodotto nella fase "solvente". Dopo avere agitato un tempo sufficiente a fare passare tutto il reagente "A" in fase solvente, l'agitatore viene spento e si lasciano separare le 2 fasi. Il solvente galleggia su un "piede" di acqua. A questo punto viene sfruttato il sistema di separazione di fasi di cui è dotato il reattore e si asporta la soluzione acquosa di sali sottostanti. Per fare passare in soluzione acquosa ulteriori quantità di sali e per eliminare altre impurezze sono necessari ulteriori 2 lavaggi con acqua demineralizzata da 300 litri ciascuno. Entrambi questi lavaggi sono eseguiti con la stessa tecnica dell'agitazione, che è seguita da una decantazione e separazione di fase. Il solvente, in cui è sciolto il composto "A", ha a questo punto ancora una quantità di acqua indesiderata, che deve essere rimossa mediante distillazione, con condensazione "a ricadere" e separazione delle tracce di acqua per mezzo del sistema di separazione di fasi installato sotto i condensatori. Si procede in questa operazione fino a scendere al di sotto dello 0.1% di acqua analizzata con il metodo Karl-Fischer. Prima di caricare il composto "B" e portare quindi a termine questo primo step del processo, è necessario raffreddare il reattore ad una temperatura di +4°C per trovarsi al di sotto della temperatura di infiammabilità del solvente [6]. Questa ulteriore misura di sicurezza viene applicata nonostante il sistema di polmonazione del reattore ed il meccanismo di carico del solido a rotocella anch'esso flussato con azoto. Si procede, quindi, col carico di 200 kg del composto "B" anch'esso in polvere. Il composto "B" è solubile nel solvente organico aromatico, ma non reagisce con "A" in assenza della Litio ammide. La miscela di reagenti così ottenuta è di circa 1200 litri e viene spostata in un altro serbatoio (anch'esso polmonato con azoto). Questo espediente permetterà di liberare il reattore e di rialimentare successivamente la miscela "A"+"B" in modo graduale come richiesto dal tipo di reazione.

2.3. Reazione di alchilazione

In presenza di litioammide, in fase "solvente", avviene l'alchilazione del composto "B" con l'aggiunta del composto "A" per formare il prodotto "C" con la liberazione di ammoniaca in fase gassosa e la formazione di cloruro di litio (LiCl), che rimane sospeso nella fase solvente [7]. Come già detto la reazione è debolmente esotermica, viene condotta a 80°C, ma per effetto del calore sottratto dall'evaporazione del solvente e per l'addizione "a freddo" della miscela dei reagenti ("A"+"B") occorre comunque scaldare leggermente il reattore. La reazione procede con una buona resa fino alla quasi totale scomparsa del composto "B" con la rimanenza dell'eccesso di "A" (di circa il 28%) e di catalizzatore $LiNH_2$ (ancora il 28%).

2.4. Reazione di alchilazione: descrizione dell'impianto

Riprendendo la descrizione della produzione su scala industriale del principio attivo, si ricorda che nello step precedente il reattore era rimasto vuoto dopo il trasferimento della miscela dei reagenti nel serbatoio ausiliario. La scelta di alimentare in modo continuo la miscela di reagenti "A"+"B" era già stata fatta fin dalle prime prove calorimetriche e costituisce un potente espediente per potere interrompere in qualsiasi modo la reazione in caso di eventuale perdita di controllo della stessa. Tale misura potrebbe sembrare eccesiva in questo caso (vista la debole esotermicità), ma si giustifica ugualmente per il possibile sviluppo di ammoniaca gassosa, che è indotto dalla reazione e per l'elevata reattività della Litio ammide. Nel reattore vengono caricati 400 litri di solvente anidro mentre il reattore viene mantenuto a +4°C. Successivamente vengono caricati 25 kg di litioammide in polvere, sempre utilizzando il sistema a tramoggia e rotocella con flusso di azoto. La litioammide rimane in sospensione nel solvente. Si procede, a questo punto, con il riscaldamento del reattore a 80°C. A questa temperatura la pressione del reattore è atmosferica. La reazione di alchilazione avviene per aggiunta della miscela "A"+"B", che viene alimentata dal serbatoio ausiliario a portata costante. Il preciso controllo della portata dei reagenti costituisce uno dei punti critici dell'intero processo. Per questa ragione è stato predisposto un sistema di alimentazione costituito da una pompa centrifuga con motore elettrico a giri variabili comandato da un variatore di frequenza (inverter). Lo scopo di questo sistema è di tenere costante la pressione a valle della pompa e renderla indipendente dal battente del serbatoio di provenienza (contenente la miscela di reagenti). Un trasmettitore di pressione regola la velocità della pompa così come evidenziato nello schema di impianto in Fig. 4. La garanzia di controllare bene la portata di alimentazione della miscela "A"+"B" nel reattore è assicurata dal fatto di avere stabilizzato la pressione a monte della "valvola di regolazione della portata" e da un misuratore di flusso "massico", considerato uno degli strumenti più affidabili per la misura della portata. Come ulteriore garanzia di alimentare la miscela dei reagenti con la giusta portata è stata installato uno strumento "rotametro" con segnalazione di flusso di minimo (FSL) e massimo (FSH). La portata di circa 300 ÷ 400 litri/h permette:

- un'adeguata cinetica di reazione [8] (anche considerando le difficoltà dovute alla scarsa solubilità della litioammide);
- un facile smaltimento dell'esiguo calore di reazione;
- uno sviluppo di ammoniaca facilmente gestibile dall'impianto utilizzato per il suo abbattimento.

Durante la fase di reazione, come già detto, la camicia deve riscaldare leggermente. Si verificano valori di ingresso nella camicia di circa 95°C, contro gli 80°C presenti all'interno del reattore. Un ulteriore contributo di raffreddamento viene dato dalla portata di borbottaggio di azoto gassoso, che fluisce attraverso uno dei tubi pescanti "annidati" nel frangiflutti speciale sopra descritto. Lo scopo di tale flusso di azoto è quello di facilitare l'allontanamento dell'ammoniaca gassosa, che si forma. Il sistema di condensazione, costituito da 2 condensatori in serie operanti a temperature diverse, merita considerazioni specifiche. Infatti si deve notare come la solubilità dell'ammoniaca nel solvente aromatico utilizzato sia maggiore a temperatura più bassa. Stando così le cose, se si condensasse con un unico condensatore alla temperatura più bassa a disposizione tra i fluidi di servizio dello stabilimento (in questo caso acqua e glicole a -5°C) si avrebbe un buon abbattimento del solvente ed un suo spinto raffreddamento e di conseguenza un superiore assorbimento di calore (fatto, comunque, necessario per questioni ambientali), ma si avrebbe anche un'indesiderata ricaduta di ammoniaca disciolta nel reattore a svantaggio della cinetica di reazione. Per ovviare a questo inconveniente è stato aggiunto uno step intermedio di condensazione a temperatura più elevata (operante mediante un apposito circuito di olio siliconico a +30°C), ove la solubilità dell'ammoniaca è molto bassa. In tal modo gran parte del solvente condensa in questo primo condensatore, mentre l'ammoniaca prosegue (in fase gassosa) al condensatore successivo, che ha il solo scopo di condensare i residui di solvente. Il funzionamento del primo condensatore ad olio siliconico previene anche da possibili problemi di compatibilità chimica con la miscela di reazione in caso di perdita accidentale del mezzo refrigerante verso il processo. In questo condensatore il fluido refrigerante (olio siliconi-



Fig. 5 - Condensatori



Fig. 6 – torri di abbattimento dell'ammoniaca

co a 30°C) passa all'interno di tubi di titanio, mentre la condensazione del solvente di processo avviene lato mantello (costruito in vetro). A valle del sistema di condensazione è previsto un impianto di conversione dell'ammoniaca funzionante con due colonne di assorbimento, nelle quali ricircola acido solforico. La reazione di neutralizzazione dell'ammoniaca porta alla formazione di una soluzione di solfato di ammonio, che viene impiegata nel campo dei fertilizzanti azotati. Nelle Figg. 5 e 6 vengono mostrati i condensatori e le torri di abbattimento dell'ammoniaca. L'alimentazione dei reagenti e conseguentemente la reazione chimica hanno una durata di circa 4 ore.

2.5. Processo chimico di eliminazione degli eccessi di catalizzatore e di "A"

Come detto in precedenza, la reazione è stata condotta con un eccesso di catalizzatore del 28% e del composto "A" in misura sempre del 28%. A questo punto, per raggiungere gli standard di qualità richiesti dalla specifica del prodotto, occorre eliminare quasi del tutto questi eccessi. Per quanto riguarda la litioammide ($LiNH_2$) si procede alla sua conversione mediante acqua, formando così ulteriore ammoniaca gassosa (NH_3) e idrossido di litio (LiOH), che è solubile in acqua. L'eliminazione di "A" avviene senza l'ausilio di reazioni chimiche, bensì per sua distillazione.

2.6. Eliminazione degli eccessi di catalizzatore e di "A": scelta impiantistica adottata

Una volta eseguita la reazione chimica, prima di procedere alla distruzione dei composti in eccesso, (catalizzatore e reagente "A") si raffredda il reattore a circa 50°C. La quantità di acqua stechiometrica calcolata per convertire la litioammide in eccesso sarebbe di 20 litri. Si è deciso di alimentare 150 litri ad una portata estremamente lenta di circa 50 litri/ora impiegando circa 3 ore per tale dosaggio. Tale lungo tempo di alimentazione è derivato dalle considerazioni emerse durante le prove effettuate col calorimetro di reazione. Le valutazioni (già esposte) vengono qui riassunte:

- scarsa solubilità della litioammide nel solvente;
- scarsa solubilità dell'acqua nel solvente e conseguenti tempi lunghi per ottenere un contatto acqua/litioammide;
- notevole esotermicità del processo;
- necessità di contenere lo sviluppo di ammoniaca ad una portata facilmente gestibile dall'impianto di conversione dell'ammoniaca a solfato di ammonio.

Come sistema di alimentazione, che garantisca una portata così limitata (50 kg/h), è stato scelto un serbatoio di vetro posto al di sopra del reattore e dotato di un orifizio calibrato sul fondo. La suddetta soluzione è stata possibile grazie alla pressione atmosferica del reattore. Al

termine di questa reazione l'idruro di Litio formatosi rimane in soluzione acquosa. Tuttavia è necessario aggiungere ulteriore acqua (circa 150 litri) di lavaggio per facilitare la solubilizzazione di vari composti nella fase acquosa (LiOH, LiCl, ed altre impurezze). Con il metodo già descritto in precedenza (stop dell'agitatore; formazione della fase solvente al di sopra della fase acquosa) viene poi allontanata la fase acquosa sottostante contenente le impurezze. Si procede con un ulteriore lavaggio con acqua demineralizzata (300 litri) e successiva decantazione e separazione della fase acquosa. A questo punto può partire la fase di distillazione del componente "A" (più volatile del prodotto "C"), che avviene sotto vuoto per mezzo di una pompa da vuoto "a secco", capace di graduare il livello di vuoto nel reattore. Per ottenere, infatti, una buona distillazione del componente "A" occorre procedere lungo una curva ben precisa di pressione (e conseguentemente, di temperatura) per un tempo totale che è di circa 6 ore. La pressione iniziale è di 60 mmHg assoluti, ad una temperatura di 50°C mentre la pressione finale è di soli 5 mmHg assoluti, ad una temperatura di 70°C. Durante la distillazione il solvente che evapora, insieme al composto "A", viene condensato e stoccato in un serbatoio per un suo successivo recupero. Al termine della distillazione dell'eccesso di "A", rimane nel reattore una fase "oleosa" costituita da solvente, prodotto "C" e qualche impurezza.

2.7. Trasformazione del prodotto nella forma cloridrata (Chimica)

L'ultimo step della reazione chimica consiste nella conversione del prodotto ottenuto "C" nella sua forma cloridrata, che lo rende così solubile in acqua e consentirà poi il suo utilizzo come principio attivo farmaceutico. Si procede, quindi, all'addizione di acido cloridrico, il quale forma (con l'azoto dei gruppi alchilici) un sale quaternario cloroidrato e quindi solubile in acqua. Tale passaggio è mostrato dalla Fig. 3.

2.8. Trasformazione del prodotto nella forma cloridrata: descrizione dell'impianto

Dal punto di vista impiantistico l'ultimo step di produzione qui descritto vede le seguenti operazioni:

- raffreddamento del batch a 25°C;
- immissione di azoto nel reattore e conseguente ritorno della pressione a valori atmosferici;
- aggiunta di 160 litri di acqua demineralizzata;
- aggiunta di acido cloridrico diluito al 15% e mantenimento del pH a valori compresi tra 3 e 3,5.

L'operazione di conversione del prodotto nel suo corrispondente cloridrato non comporta particolari criticità se non la necessità di un tempo relativamente lungo a causa della presenza di due fasi diverse. Durante tale tempo (di circa 2 ore) il prodotto cloridrato passa nella fase acquosa. Come già detto in precedenza, il reattore è di acciaio smaltato ed è in grado di trattare agenti particolarmente aggressivi come, in questo caso, l'acido cloridrico. Anche le altre apparecchiature correlate (tubazioni, condensatori, strumenti, ecc...) sono costruite in materiali resistenti agli acidi quali ad esempio, vetro, teflon, altri polimeri ed il fascio tubiero del condensatore è costruito in titanio. La successiva fermata dell'agitatore permette al poco solvente residuo (stimato in circa 25 kg) di separarsi e di galleggiare sulla fase acquosa contenente il prodotto. L'ultimo step che coinvolge il reattore in questione consiste nel trasferimento (contemporaneo ad una filtrazione) del prodotto in un altro reattore, ove avverrà la cristallizzazione mediante aggiunta di una soluzione alcoolica. Le operazioni di centrifugazione ed essiccamento permetteranno infine di ottenere circa 250 kg di prodotto in polvere.

3. CONCLUSIONI

Nel caso qui esposto, prima di passare alla realizzazione su scala industriale, è stato condotto uno studio attento del processo mediante calorimetria di reazione con una scala di prova, che ha permesso di simulare molto verosimilmente il processo industriale. Dalle osservazioni e dai dati ricavati è stato quindi possibile eseguire uno scale-up ed un dettagliato bilancio di

massa e di energia, che ha permesso di individuare quale reattore fosse più adatto a produrre (a campagne) il principio attivo tra quelli a disposizione dell'azienda Biosint SpA di Sermoneta (LT). L'esecuzione del processo su scala industriale ha dovuto tenere conto degli elementi economici (resa e qualità) così come di quelli ambientali, di sicurezza e di igiene industriale [9]. Naturalmente è stato necessario eseguire qualche lavoro di adattamento dell'impianto preesistente per metterlo in condizioni di condurre un processo con tante particolarità come quello qui esaminato. Tra le varie dotazioni impiantistiche, alcune sono abbastanza tipiche dell'industria chimica/farmaceutica altre, invece, sono state studiate appositamente per questo processo. In conclusione, si vogliono ricordare soltanto questi ultimi accorgimenti:

- dosaggio molto preciso della miscela di reagenti grazie al controllo della pressione di mandata della pompa di alimentazione e della misura della portata con strumento "massico";
- condensazione a 2 temperature diverse del solvente per favorire l'allontanamento dell'ammoniaca gassosa;
- frangiflutti del reattore in acciaio smaltato molto particolare per favorire le sospensioni e dotato inoltre di sistemi per insufflaggio di azoto, per presa campione e misura di pH;
- fuoriuscita controllata dell'ammoniaca e sua conversione in solfato di ammonio con apposito impianto di assorbimento a 2 colonne;
- distruzione controllata dell'eccesso di litioammide.

BIBLIOGRAFIA

- P. Cardillo, "Incidenti in Ambiente Chimico – Guida allo studio e alla valutazione delle reazioni fuggitive", SSC, Milano, 1998, pp. 165-168.
- P.F. Nolan, J.A. Barton, "Some lessons from thermal-runaway incidents", Journal of Hazardous Materials, 14, 1987, pp.233-239.
- National Fire Protection Association "Manual of Hazardous Chemical Reactions", 4a edizione, 1971, pp. 16-17.
- IChemE, "Chemical Reaction Hazards – a guide to safety", Ed. J. Barton and R. Rogers, 2a edizione 1998, pp 22.
- R. Lauri, L.G. Luccone, G. Mari, C. Metaponte, V. Romani, "Gestione in sicurezza di una reazione chimica esotermica avente sviluppo di idrogeno", VGR Pisa, Ottobre 2008;
- L. Bretherick "Handbook of Reactive Chemical Hazards", 7a edizione, Ed. P.G. Urben, 2006, pp. 102.
- R.C. Reid, J.M. Prausnitz, T.K Sherwood, "The properties of gases and liquids, third edition", McGraw-Hill Book Company, New York, 1977, pp. 32-33.
- G. Gygax, "Chemical Reaction Engineering for Safety", Chem. Eng. Sci., 1988, pp. 67.
- Decreto legislativo del governo del 17 agosto 1999, n. 334, Attuazione della direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose (pubblicato sul Supplemento Ordinario n. 177 alla Gazzetta Ufficiale n. 228 del 28 settembre 1999.

Alfa Consulting e la "Specifica tecnica applicativa del D.M. 329/04 (per la messa in servizio e l'utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione)": dalla ricerca e sviluppo all'esperienza operativa

S. Galasso* - P. Mineo*
**ALFA CONSULTING S.r.l.*

1. INTRODUZIONE

Alfa Consulting S.r.l. è una società di servizi che opera nel campo della progettazione, direzione e supervisione lavori per la realizzazione di impianti industriali nel settore chimico e petrolchimico.

Negli anni si è conquistata un posto di rilievo nel panorama nazionale ed ha avuto modo, inoltre, di lavorare con decine di società presenti sul territorio italiano ed, in particolare, con diverse società del gruppo ENI (Saipem, Enimed, Raffineria di Gela, Polimeri Europa, Syndial, etc.).

Negli ultimi anni Alfa Consulting, in qualità di socio del Comitato Termotecnico Italiano (CTI), è diventata membro attivo dei gruppi di lavoro per l'emanazione delle specifiche tecniche applicative del DM 329/04 sull'esercizio delle attrezzature a pressione.

Sin dall'entrata in vigore del DM 329/04, Alfa Consulting ha collaborato con le società Raffineria di Gela ed Enimed per ottemperare a quanto indicato nell'art. 16 del Decreto, riguardo la denuncia delle tubazioni e recipienti per liquidi degli impianti non soggetti a precedenti obblighi di legge.

2. STATO DELL'ARTE DELLA NORMATIVA SULLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

Con l'emanazione del DM "329/04" sono stati previsti all'art. 16 i requisiti che devono essere rispettati dai recipienti per liquidi e tubazioni già in esercizio alla data di entrata in vigore di tale decreto e non certificati CE. Nel quinquennio trascorso, dunque, tutti gli utilizzatori di attrezzature a pressione si sono attivati per adeguare i propri impianti alle disposizione imposte dal suddetto decreto ministeriale. Subito dopo l'entrata in vigore del DM 329/04, per certi aspetti, non risultavano ancora chiare le modalità con cui ottemperare ai vari articoli della legge, in attesa anche dell'emanazione di specifiche tecniche applicative elaborate dal Ministero delle Attività Produttive in collaborazione con Ispesl, Uni e tutte le associazioni di Categoria come previsto all'art.3.

In tale contesto l'Alfa Consulting, in qualità di membro attivo dei gruppi di lavoro del CTI , ha potuto offrire agli utilizzatori consulenza sul corretto approccio da seguire per adeguarsi alle disposizioni del DM 329/04.

Durante i quattro anni disponibili per adeguare gli impianti agli adempimenti di legge previsti dal suddetto decreto abbiamo infatti individuato, in accordo all'Utilizzatore degli impianti e

all'ente preposto Ispesl, una procedura sia per la raccolta delle informazioni di tutte le tubazioni costruite prima dell'entrata in vigore della direttiva Ped, sia per la preparazione di tutta la documentazione da presentare all'ispesl entro la data di scadenza che imponeva il decreto.

Inoltre, in attesa della specifiche tecniche applicative del DM 329/04, Alfa Consulting ha adottato la lettera circolare ISPESL N. A00-09/0001673 del 27/4/2007 e le indicazioni fornite dal dipartimento Ispesl di Palermo per elaborare una procedura per la denuncia delle tubazioni, già esistenti alla data del 12/02/2005 e comunque non certificati PED, in accordo all'art. 16 del D.M.329/04.

La circolare ISPESL, frutto anche delle argomentazioni sviluppate nell'ambito del gruppo di lavoro al CTI, si proponeva di fornire un documento che aiutasse gli utilizzatori nella presentazione delle denuncie in attesa della specifica tecnica pubblicata ufficialmente nel 2009 come UNI/TS 11325-1:2009 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 1: Valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica d'integrità .

La procedura elaborata da Alfa Consulting ha previsto un'approccio sistematico col quale raggruppare le tubazioni da denunciare mettendone in evidenza le caratteristiche fisiche, chimiche e processistiche.

3. STRUTTURA DELLA PROCEDURA

Le analisi svolte sui componenti in pressione, secondo i flussi logici indicati sia dalla lettera circolare Ispesl che dalla norma UNI/TS 11325-1:2009, hanno permesso di eseguire le valutazioni sullo stato di conservazione per le tubazioni, da denunciare secondo il D.M. 329/04, in modo da poter determinare uno stato della tubazione a una data fissata, precedente al momento della denuncia, e quantificare la vita residua della tubazione assicurandosi che in tale periodo di tempo il funzionamento della tubazione non possa arrecare danni alle persone e alle cose.

A seguito della classificazione, al fine di agevolare l'individuazione delle attrezzature a pressione e per una migliore gestione delle analisi dei rischi e dell'attività di sorveglianza da parte dell'utilizzatore, le linee oggetto del censimento sono state raggruppate in insiemi omogenei. Il criterio adottato per il raggruppamento è fondato sull'analisi dei meccanismi di danneggiamento ipotizzabili per il tipo di servizio svolto dalle tubazioni.

L'impianto è stato dunque suddiviso in sezioni a danno similare attraverso le seguenti fasi:

1 analisi del processo e caratterizzazione dei fluidi dal punto di vista della loro azione corrosiva, erosiva ecc. ;

2 identificazione dell'interazione fluido/materiali e dei meccanismi di danno;

3 suddivisione dell'impianto in sezioni a danno similare le quali hanno in comune:
- fluido di processo
- intervallo di pressione di esercizio
- intervallo di temperatura di esercizio
- materiali tubazione

In questo modo il circuito risultante è da considerarsi come un'unica tubazione ai fini della definizione del piano dei controlli e della determinazione dello stato di conservazione ed efficienza. La metodologia, adottata per esempio presso i centri raccolta olio di Enimed, ci ha permesso di ottemperare agli obblighi di legge e ha fornito alla committente un ulteriore strumento per il controllo e l'esercizio in sicurezza delle tubazioni .

Per poter effettuare le valutazioni necessarie a stabilire lo stato di conservazione occorre preliminarmente raccogliere i dati identificativi e descrittivi della tubazione classificati dal D.M. 329/04 in due categorie

Essenziali				Facoltativi	
1	utilizzatore	9	PS [Barg]	1	Pressione di esercizio [Barg]
2	Sito impianto	10	TS_{min} [°C]	2	Temperatura di esercizio [°C]
3	indirizzo	11	TS_{max} [°C]	3	Controlli
4	Unità impianto	12	Nome del fluido	4	Specifica/Materiale
5	Identificazione linea	13	Gruppo del Fluido	5	Disegno assonometrico
6	Partenza/arrivo	14	Stato fisico del fluido		
7	P&ID	15	Tabella e Categoria PED		
8	DN_{max} [mm]	16	Accessori di sicurezza		

Tab. 1

Una volta identificate le caratteristiche di processo per le linee costituenti l'impianto la fase successiva si compone a sua volta di due fasi:

a) Determinazione dello stato di conservazione

b) Determinazione dello stato di efficienza

Per la valutazione dello stato di conservazione e dell'efficienza delle attrezzature, installate nell'impianto di appartenenza delle tubazioni denunciate, è stato adottato un approccio di tipo ispettivo secondo la norma internazionale API 570.

Questo tipo di approccio consiste nel condurre una valutazione differente a seconda dei circuiti di tubazioni. All'interno del sistema complessivo delle tubazioni costituenti l'impianto si è identificato il circuito come un insieme di tubazioni costruite impiegando gli stessi materiali e aventi in comune le medesime condizioni ambientali, di esercizio, ecc.

La norma UNI/TS 11325-1:2009[1] riporta (in Appendice B) una casistica di possibili cause di danno e relativi meccanismi di danno attesi. Pertanto per singola attrezzatura a pressione è stato definito un piano di controllo (esame visivo e controllo spessimetrico) dedicato.

Di seguito si riporta un estratto di tale tabella nella quale si possono individuare alcuni dei casi possibili applicabili.

TIPO	Cause di danno	Meccanismo di danno	Metodi e tecniche PND
a	fluido con presenza di impurità acide caustiche e condizioni di esercizio con separazione di acqua dal processo	corrosione interna nei punti di condensazione.	VT, GW, ST, RT
d	iniezioni di neutralizzanti, additivi, filmanti nel processo.	corrosione localizzata a valle del punto di iniezione.	VT, GW, ST, RT
f	agenti atmosferici esterni, umidità dell'aria associata alla presenza di agenti aggressivi (quali cloruri e solfuri), dovuti, per esempio, all'ambiente marino o industriale.	corrosione esterna generalizzata e/o localizzata, corrosione sotto coibente (CUI).	VT, GW, ST, RT
h	trascinamento di cloruri nel processo nelle tubazioni in acciaio inossidabile austenitico in corrispondenza delle zone tensionate a temperature maggiori di 60 °C, o concentrazione di cloruri al di sotto della coibentazione provenienti dall'ambiente marino o industriale.	stress corrosion cracking (SCC) della tubazione in corrispondenza delle zone maggiormente tensionate (punti fissi,zone termicamente alterate delle saldature, componenti lavorati a freddo, ecc).	VT, AT, UT,PT,MT, RT, ET, LT
v	presenza di acido solfidrico (H2S) umido su tubazioni costituite da acciai al carbonio e/o basso legati	hydrogen induced cracking (HIC), stress oriented hydrogen induced cracking (SOHIC) e blistering da idrogeno, sulfide stress corrosion cracking (SSCC).	VT, AT, UT,PT,MT, RT, ET, LT

Tab. 2

Seguendo questa impostazione l'analisi della singola tubazione ha tenuto conto: del tipo di fluido (composizione, stato fisico), dei metodi di prevenzione del danno adottati all'atto della fabbricazione e dell'installazione (coibentazione, scarichi di condensa, drenaggi, rivestimenti, trattamenti termici, ecc.). Si è tenuto conto inoltre dei possibili meccanismi di danno durante

l'utilizzazione (condizionamenti chimici, procedure o dispositivi di conduzione particolare, sollecitazioni generalizzate e localizzate).

L'analisi dei risultati è stata effettuata attraverso un sistema di classificazione secondo la definizione del cosiddetto "rating" e della "specifica di linea". Il metodo di valutazione adottato verte sul confronto tra i valori spessimetrici di progetto determinati dalla specifica di linea ,scelta di progetto dell'Utilizzatore, e i valori residui rilevati per ciascuna linea ispezionata.

Nel caso in cui una linea presenta, in sede di controllo spessimetrico, una riduzione locale di spessore fino al 50% del valore di progetto (previsto in specifica), si prevede di attenzionare maggiormente la linea secondo step successivi:

- prima fase: incremento della frequenza di ispezione solo nel caso in cui si osservi un ulteriore calo di spessore delle sezioni già attenzionate.
- seconda fase: esecuzione calcolo di stabilità per la linea in oggetto sulla base dei valori rilevati.

Nel caso di calcolo con esito negativo, si passa all'analisi dei meccanismi di corrosione e individuazione di una adatta metallurgia per la linea; una volta individuato il materiale idoneo, si passa alla sostituzione della linea.

Al termine della valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni si provvede ad indicare la data limite successiva per i controlli.

Le valutazioni per la determinazione di tale data sono fatte a seguito delle risultanze dei controlli.

4. ESPERIENZA OPERATIVA DELLA PROCEDURA ATTUATA: APPLICAZIONE SU IMPIANTI NEL SETTORE PETROLIFERO (UP-STREAM)

4.1. Analisi tecnica di conservazione

Analisi del processo

Di seguito si vuol mostrare un esempio di valutazione, da noi effettuata, su linee ricadenti negli obblighi di denuncia appartenenti a un centro di raccolta olio, il quale riceve il greggio estratto da due piattaforme off-shore e lo tratta per poi inviarlo a stoccaggio presso dei serbatoi presenti all'interno di una raffineria adiacente.

In particolare la sezione rappresentata in figura 1 contiene apparecchiature (Preriscaldatore Olio HA-001,separatore di produzione VS-001, degasatore VD-001), appartenenti alla unità di separazione di questo impianto.

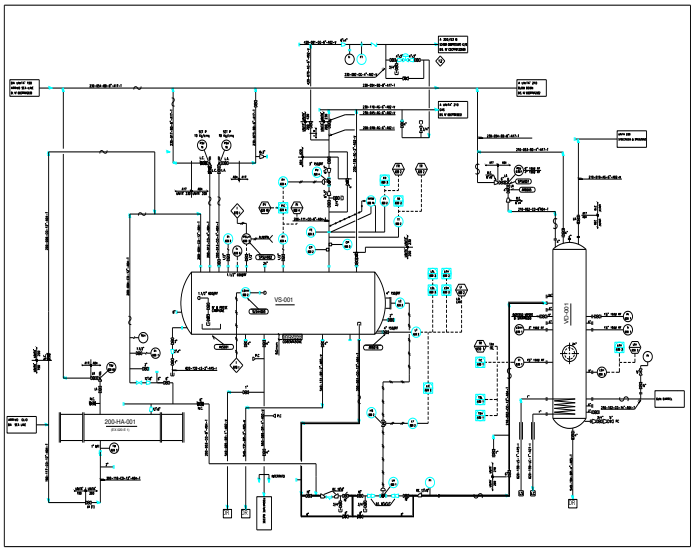


Figura 1

Nell'attraversamento delle apparecchiature l'olio viene prima preriscaldato all'interno dell'HA-001 per poi giungere all'interno del separatore VS-001. Lo scopo del preriscaldamento è duplice:

- facilitare la separazione del gas dalla massa del liquido abbassando la viscosità del liquido stesso;
- favorire la stabilizzazione del greggio, aumentando la quantità di gas prodotto con il conseguente abbassamento della sua tensione di vapore a temperatura ambiente.

All'interno del separatore VS-001 la fase liquida viene degasata, alla pressione del separatore e poi scaricata, in controllo di livello, verso il degasatore VD-001 che lavora a pressione atmosferica.

Le linee in denuncia sono quelle evidenziate in grassetto in figura 1; si tratta delle linee così denominate:

- 12"-200-CO001-A04-T
- 12"-210-CO002- A04-T

queste trasportano il greggio dal VS-001 al VD-001. Il fluido trasportato dalle linee di questo gruppo è olio greggio che ha subito una prima separazione della fase gassosa all'interno del VS-001. Un sistema di controllo sul livello all'interno del VS-001 aziona la valvola LV-001 che aprendosi permette il passaggio del greggio verso il separatore bifase VD-001.

Analisi e dei meccanismi di danno

Note le funzioni di esercizio delle linee e le condizioni di progetto qui di seguito riassunte si è passati all'analisi dei meccanismi di danno determinando quali possibili:

1) fluido con presenza di impurità acide caustiche e condizioni di esercizio con separazione di acqua dal processo;
2) agenti atmosferici esterni, umidità dell'aria associata alla presenza di agenti aggressivi (quali cloruri e solfuri), dovuti, per esempio, all'ambiente marino o industriale;
3) presenza di acido solfidrico (H2S) umido su tubazioni costituite da acciai al carbonio e/o basso legati;

Sigla Item	Partenza	Arrivo	Materiale	Tipo Fluido	Natura Fluido	TDV > 0,5 < 0,5	Gruppo Fluido (1 -2)	PS (Bar g)	TS Min/Max (°C)
12"-200-CO001-A04-T	VS-001	12"-210-CO002-A04-	API 5L Gr.B	CRUDE OIL	Liquido	> 0,5	1	15	0/300
12"-210-CO002-A04-T	12"-200-CO001-A04-	VD-001	API 5L Gr.B	CRUDE OIL	Liquido	> 0,5	1	15	0/300

Tab. 3

Piano dei controlli:

Per la determinazione dello stato di conservazione delle linee e di eventuali danneggiamenti dovuti all'esercizio (p.es cali di spessore , corrosione localizzata / diffusa ecc.), sono stati eseguiti dei controlli scelti in funzione dei meccanismi di danno prevedibili. Per ogni linea è stato definito il piano dei controlli secondo quanto fissato dalla norma UNI/TS 11325-1:2009. Di seguito è riportato un modello tipico per la redazione del piano dei controlli (alcuni campi sono stati lasciati intenzionalmente in bianco).

In questo caso si è prima eseguito un esame visivo (di screening) sulla tubazione, al termine si è provveduto a documentare i risultati con un rapporto. Successivamente al controllo visivo sono stati eseguiti i controlli ultrasonori (di dettaglio) sui componenti delle tubazioni più soggette a danneggiamenti (p.es curve, flange, stacchi, riduzioni, fondelli, punti morti di stagnazione del fluido, ecc.).

Di seguito è riportato un modello tipico per la redazione dei Ns. Report ispettivi.

Piano dei controlli per la valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle attrezzature a pressione.					ALFA CONSULTING
Data controllo: dd-mm-aa					
Data precedente controllo:					
Controllo effettuato da: --------					
Impianto: ---------		Sigla linea: 200-001-CO-12”			
Specifica linea: A04	Materiale: API 5L Gr. B		DN.12”	Sp.6,35 mm.	Sdc.3 mm.

1	**SIGLA**	**CONTROLLI NON DISTRUTTIVI**		**ESTENSIONE DEI CONTROLLI**
1.1	VT	Esame visivo	Si/No	**XXX %**
1.2	UT	Controlli di spessore con ultrasuoni	Si/No	**XXX %**
1.3	PT	Liquidi Penetranti	Si/No	**XXX %**
1.4	RT	Radiografia	Si/No	**XXX %**
1.5	MT	Magnetoscopia	Si/No	**XXX %**
1.6	ET	Correnti indotte	Si/No	**XXX %**
1.7	AT	emissione acustica	Si/No	**XXX %**

SIGLA LINEA: 200-001-CO-12”-A04-T
PER ZONE SOTTOPOSTE A CONTROLLI
VEDERE SK 8112MN1 FG. 1/2-2/2

Cod.	**Descrizione danneggiamento**	**Interventi richiesti**	

Tab. 4

Controllo Visivo per la valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle attrezzature a pressione.					ALFA CONSULTING
Data controllo : dd-mm-aa					
Data precedente controllo :					
Controllo effettuato da : --------					
Impianto: ---------		Sigla linea: 200-001-CO-12”			
Specifica linea: A04	Materiale: API 5L Gr. B		DN.12”	Sp.6,35 mm.	Sdc.3 mm.

Cod.	**Oggetto**	**Osservazioni**	**Cod.**	**Oggetto**	**Osservazioni**
1	**EVENTUALI PERDITE**		**5**	**CORROSIONE**	
1.1	Da tubazione principale	Si/No	5.1	Corrosioni esterne	Si/No
1.2	Da stacchi	Si/No	5.2	Corrosioni tipo crevice sotto supporti a cravatta	Si/No
1.3	Da giunti flangiati	Si/No	5.3	Deterioramento verniciatura	Si/No
1.4	Da accompagnamento vapore	Si/No	5.4	Zona bagnasciuga se linea interrata	Si/No
1.5	Presenza cravatte	Si/No	5.5	Zona termine coibentazione	Si/No
1.6	Da cravatte	Si/No	**6**	**COIBENTAZIONE**	
2	**DISALLINEAMENTI**		6.1	Danneggiamento o rottura	Si/No
2.1	Disallineamento tubo o dilatazione impedita	Si/No	6.2	Mancanza coibentazione	Si/No
2.2	Disallineamento giunto di espansione	Si/No	6.3	Deterioramento sigillatura	Si/No
3	**VIBRAZIONI**		6.6	Rigonfiamenti	Si/No
3.1	Supportazione inadeguata	Si/No	**7**	**GIUNTI**	
3.2	Supporti allentati con sfregamenti	Si/No	7.1	Giunti saldati	Si/No
4	**SUPPORTI**		7.2	Giunti flangiati e tiranti	Si/No
4.1	Scarpette fuori appoggio	Si/No	**8**	**VALVOLE**	
4.2	Deformazioni o rotture dei supporti	Si/No	8.1	Corrosioni esterne	Si/No
4.3	Sostegni elastici a fondo scala	Si/No	8.2	Deterioramento verniciatura	Si/No
4.4	Profilati rotti o deformati	Si/No	8.3	Perdite da giunti o da premistoppa	Si/No
4.5	Mensole rotte o distorte	Si/No			
4.6	Supporti corrosi	Si/No			

Descrizione danneggiamento	**Interventi richiesti**

Note:

Tab. 5

4.2. Verifica tecnica di conservazione

A seguito del controllo, noti i valori di progetto delle tubazioni (PS,TS, materiale, specifica di progetto, sovra-spessore di corrosione ecc.), si è valutata così come previsto dalla norma la rispondenza dei valori trovati ai requisiti dimensionali minimi.

Per le linee trattate, in questo caso, sono stati evidenziati cali di spessore, comunque all'interno del sovra-spessore di corrosione previsto in fase di progetto, per cui l'esito della valutazione dello stato di conservazione è stato ritenuto positivo.

4.3. Analisi tecnica di efficienza

Il controllo ha permesso di fissare, alla data in cui è stato eseguito, lo stato di conservazione delle tubazioni analizzate. Infatti, avendo a disposizione il report storico dei controlli, è stato possibile determinare il rateo di corrosione attraverso un'analisi sulla possibile evoluzione e sulle conseguenze prodotte dai meccanismi di danno noti e prevedibili.

4.4. Verifica tecnica di efficienza

Successivamente si è passati alla verifica tecnica di efficienza, analizzando la situazione esistente da un punto di vista dei sistemi di protezioni presenti in impianto. Per ciò che riguarda l'esercizio in sicurezza delle linee si è tenuto conto anche delle protezioni contro le sovra-pressioni dedicate alle linee stesse.

Dall'analisi del processo dell'impianto abbiamo constatato che, nel maggior numero dei casi, gli accessori di sicurezza contro il superamento dei limiti di progetto erano applicati direttamente ai recipienti colleganti le linee in oggetto. Alla luce di quanto sopra descritto, abbiamo provveduto alla verifica della idoneità delle PSV applicate sulle apparecchiature, collegate dalle linee CO-001 e CO-002, per la protezione delle stesse linee. In generale, la verifica è stata condotta incrementando le portate che le PSV devono essere in grado di scaricare, al verificarsi di una situazione di emergenza (p.es. incendio esterno), considerando che queste debbano proteggere anche le linee collegate alle apparecchiature da esse protette. Nel caso dell'esempio la protezione per le linee CO-001 e CO-002 è data dalla PSV 030-1 installata a protezione del VD-001. Nel caso in esame, dato che la PSV è dimensionata per incendio esterno, nel calcolo di verifica (secondo quanto previsto dalla Raccolta E,ISPESL), è stata incrementata la portata di scarico includendo nelle formule di calcolo le superfici delle linee e verificando se anche a seguito dell'incremento l'area di passaggio calcolata (di progetto) fosse inferiore alla sezione di passaggio (reale) della PSV di riferimento; l'esito del calcolo è stato positivo.

Al termine delle due fasi di valutazione dello stato di conservazione e di efficienza, in base alle risultanze dei controlli e delle analisi svolte con esiti positivi, si sono indicati, come termini per le successive verifiche di funzionamento e di integrità, quelli indicati dal decreto ministeriale 329/04, rispettivamente in 5 e 10 anni dalla data del controllo ultrasonoro, data peraltro considerata di Riferimento per la Valutazione dello stato di Conservazione (DRVC) [1].

5. CONCLUSIONI

In considerazione dell'importanza della materia trattata e del notevole impegno richiesto in termini di studio e ricerca, vogliamo sottolineare come solo la sinergia tra le parti coinvolte ha permesso di condurre la suddetta attività nella maniera più idonea al fine di fornire un prodotto qualitativamente valido che, attraverso strumenti pratici, possa guidare tutti gli operatori del settore ad una corretta ed agevole applicazione del Decreto Ministeriale 329/04.

6. BIBLIOGRAFIA

- UNI/TS 11325-1:2009 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 1: Valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica d'integrità.
- API 570- Piping Inspection Code: Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-Service Piping Systems
- Decreto 1 dicembre 2004, n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio

ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93".

- Lettera Circolare N. A00-09/0001673 del 27/4/2007 : Procedura per la valutazione e la accettazione di recipienti per liquidi e tubazioni già in esercizio alla data del 12/2/2005, commercializzati prima del 30/5/02 e non certificati PED, in accordo all'art. 16 del D.M. 329/04.

sessione TEMATICA
INTEGRITÀ STRUTTURALE DI MATERIALI E COMPONENTI

La redazione della Relazione Tecnica di cui all'art. 6 del D.M. 329/2004: case history nello stabilimento Polimeri Europa S.p.A. di Mantova

*G. Pitti**
*N. Palumbo***

** Polimeri Europa S.p.A. – Stabilimento di Mantova*
*** ISPESL – Dipartimento di Brescia*

1. SOMMARIO

L'art. 6 del D.M. 329/2004 prevede che l'utilizzatore alleghi alla dichiarazione di messa in servizio delle attrezzature a pressione una relazione tecnica, con lo schema dell'impianto, recante le condizioni d'installazione e di esercizio, le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate (comma 1 lettera b).

L'argomento sarà introdotto chiarendo per quali attrezzature a pressione non si deve dichiarare la messa in servizio all'ISPESL ed all'ASL e per quali attrezzature ed insiemi a pressione non è necessaria la verifica di primo impianto con ISPESL.

Saranno quindi analizzati dei case history di relazioni tecniche acquisite in sede di verifica di primo impianto presso lo Stabilimento Polimeri Europa S.p.A. di Mantova (d'ora in avanti PE Mantova) da parte del Dipartimento ISPESL di Brescia.

2. ATTREZZATURE ED INSIEMI A PRESSIONE ESCLUSI DALLA DICHIARAZIONE DI MESSA IN SERVIZIO

Le attrezzature ed insiemi a pressione per i quali non si deve dichiarare la messa in servizio sono quelli indicati nell'art. 2 del D.M. 329/2004.

Tra le attrezzature a pressione figurano:

- le tubazioni di collegamento, all'interno del sito industriale, fra serbatoi di stoccaggio e impianti di produzione o di esercizio;
- i recipienti a pressione aventi capacità fino a 25 litri e, se con pressione minore o uguale a 12 bar, aventi capacità fino a 50 litri;
- le attrezzature a pressione di cui all'articolo 3 comma 3 del D. Lgs. 93/2000;
- le attrezzature a pressione standard di cui all'articolo 1 comma 3 lettera a) del D. Lgs. 93/2000;
- le tubazioni con DN minore o uguale a 80.

Gli accessori di sicurezza sono esclusi dalla dichiarazione di messa in servizio in quanto vengono acquisiti nel corso della verifica di primo impianto delle attrezzature a pressione protette.

3. ATTREZZATURE ED INSIEMI A PRESSIONE ESCLUSI DALLA VERIFICA DI PRIMO IMPIANTO

Tra le attrezzature ed insiemi a pressione esclusi dalla verifica di primo impianto di cui all'art. 4 del D.M. 329/2004 figurano gli insiemi per i quali da parte del competente Organismo Notificato risultano effettuate per quanto di propria competenza le verifiche degli accessori di sicurezza o dei dispositivi di controllo (art. 5 del D.M. 329/2004). Nella Dichiarazione di conformità dell'insieme deve essere chiaramente indicato che l'Organismo Notificato ha eseguito tali verifiche.

In tal caso alla dichiarazione di messa in servizio non viene allegato il verbale della verifica di primo impianto, ma viene trasmessa una dichiarazione attestante che l'insieme è stato debitamente installato, mantenuto in efficienza e utilizzato conformemente alla sua destinazione e che non pregiudica la salute e la sicurezza delle persone o degli animali domestici o la sicurezza dei beni (D.M. 329/2004, art. 6 comma 4).

4. ITER

L'acquisto da parte di PE Mantova di un'attrezzatura a pressione soggetta alla PED (Pressure Equipment Directive) o alla direttiva SPV (Simple Pressure Vessels) è regolato da Specifiche Tecniche; in tali specifiche sono indicati i documenti richiesti al Fabbricante. In particolar modo sono richiesti la dichiarazione di conformità firmata in originale, il manuale d'installazione, uso e manutenzione in lingua italiana ed i disegni costruttivi. Al Fabbricante viene fornito da parte di PE Mantova il modulo relativo all'analisi del rischio per la definizione dei Requisiti Essenziali di Sicurezza.

L'installazione dell'attrezzature a pressione viene eseguita conformemente al manuale d'installazione, uso e manutenzione del Fabbricante e alle altre norme di sicurezza. Al termine delle operazioni di montaggio la ditta installatrice rilasca a PE Mantova la dichiarazione di corretta installazione firmata in originale.

Simultaneamente all'installazione la tecnologia d'impianto di PE Mantova predispone la relazione tecnica indicata all'art. 6 del D.M. 329/2004.

Una volta installata l'attrezzatura a pressione e preparata la Relazione Tecnica di cui all'art. 6 del D.M. 329/2004 da parte della Tecnologia d'impianto, viene richiesta all'ISPESL la verifica di primo impianto comunicando la temporanea messa in funzione.

Eseguita la verifica di primo impianto con il conseguente rilascio del verbale da parte dell'ISPESL, PE Mantova invia la dichiarazione di messa in servizio all'ISPESL e all'ASL. La documentazione di cui all'art. 6 comma 1 del D.M. 329/2004 viene allegata solo alla dichiarazione per l'ASL, mentre nella dichiarazione per l'ISPESL viene allegata solo copia del verbale di primo impianto (l'ISPESL, con lettera circolare n. 3/05 del 7/2/2005, ha stabilito che per tutte quelle attrezzature/insiemi a pressione sottoposti alla verifica di messa in servizio con ISPESL con esito positivo la relativa dichiarazione non deve essere inviata all'ISPESL).

5. STRUTTURA DELLA RELAZIONE TECNICA

5.1. Premessa

La Relazione Tecnica viene elaborata in riferimento alla lettera b del comma 1 dell'art. 6 del D. M. 329/2004 ed al fine di dimostrare che le condizioni d'installazione e di esercizio, le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate sono conformi a quanto richiesto dalla normativa vigente. In particolare si vuole dimostrare che durante il normale esercizio la pressione e la temperatura si mantengono a valori inferiori a quelli di progetto e che i dispositivi di controllo, regolazione e sicurezza sono tali da impedire che le prevedibili anomalie di esercizio possano determinare il superamento dei valori progettuali.

5.2. Descrizione dell'attrezzatura a pressione

Vengono indicati l'impianto di installazione, la sigla identificativa, il Fabbricante ed il N° di Fabbrica, la categoria di rischio ed il modulo utilizzato, l'Organismo Notificato / Ispettorato degli Utilizzatori e la funzione dell'attrezzatura. Inoltre per ogni camera sono indicati la natura e lo stato fisico del fluido, le condizioni di progetto (PS e TS), le condizioni d'esercizio (Pe e Te) ed il volume.

5.3. Natura dei prodotti trattati e compatibilità con il materiale dell'attrezzatura a pressione e dell'eventuale dispositivo di sicurezza

Vengono riportate le caratteristiche chimico-fisiche dei prodotti chimici presenti nell'attrezzatura a pressione o vengono allegate le schede di sicurezza. Inoltre viene dichiarato che nel fluido contenuto non sono presenti sostanze tali da comportare particolari effetti corrosivi all'attrezzatura a pressione ed all'eventuale accessorio di sicurezza.

5.4. Descrizione del funzionamento

Viene descritto il funzionamento dell'attrezzatura facendo riferimento allo schema di processo (che viene allegato) ed ai sistemi di protezione, controllo e regolazione.

5.5. Allarmi e blocchi

Per i dispositivi di allarme e blocco vengono indicati la sigla, la funzione, il set e l'azione svolta.

5.6. Accessori di sicurezza

Vengono indicate:

- le caratteristiche del dispositivo di sicurezza (sigla, tipo, fabbricante, N° lotto/fabbrica, tipo, area di scarico, pressione di taratura/frattura, sovrapressione/tolleranza di frattura);
- le condizioni di scarico (contropressione, pressione critica, natura e stato fisico fluido, ipotesi di scarico dimensionante, portata da scaricare, area minima necessaria, se scarico convogliato, eventuali intercetti da sigillare aperti, eventuali allarmi, ecc.).

5.7. Anomalie prevedibili e relativi provvedimenti

Sulla base dell'analisi dei rischi, viste le condizioni di esercizio, i fluidi presenti, le condizioni dell'impianto ed i parametri di progetto, vengono indicate le prevedibili anomalie che possono determinare l'aumento di pressione e/o di temperatura. Tra queste vi possono essere:

- l'incendio esterno;
- le anomalie di esercizio (apporto di calore da sorgenti esterne non dovute ad incendio; disservizi dei controlli automatici o dei meccanismi di regolazione automatica compresi i dispositivi di riduzione della pressione, p. e. il guasto di uno strumento, la mancanza di energia elettrica o di aria strumentale; disservizi, quali mancanza acqua di raffreddamento, mancanza vapore, mancanza combustibile, mancanza gas inerte, mancanza di fluido assorbitore; rottura di tubi scambiatori; colpo di ariete; immissione di sostanze; reazione chimica; espansione di liquido per calore tecnico; errori umani; altro).

Ogni anomalia considerata viene descritta indicando l'eventuale norma di riferimento, la causa che ha creato l'anomalia, quali sistemi di prevenzione sono presenti (allarmi di processo, supervisori operativi, sistemi strumentali di controllo, pressostati, termostati, livellostati), quali sistemi di protezione (valvola di sicurezza, disco a frattura prestabilita).

In caso di installazione di dispositivo di sicurezza (valvola di sicurezza, disco a frattura prestabilita) viene allegato il foglio di calcolo.

Nel caso di pressione predisposta a monte per massima prevalenza della pompa, viene allegata la curva caratteristica.

5.8. Allegati

Alla Relazione Tecnica vengono allegati:

- l'Analisi dei Rischi (vedere Modulo MNP52434 in Appendice A);
- il foglio di calcolo dell'eventuale accessorio di sicurezza (vedere modulo Valvola di Sicurezza in Appendice B);
- il certificato del Fabbricante e di taratura dell'eventuale accessorio di sicurezza;
- nel caso di scarico convogliato o di guardia idraulica, nota tecnica di dimensionamento;
- eventuale curva caratteristica della pompa;
- schema d'impianto.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] G. Pitti: "L'esercizio delle attrezzature a pressione alla luce del D.M. 329/2004: l'esperienza dello stabilimento Polimeri Europa S.p.A. di Mantova" negli Atti del Convegno *Sicurezza ed affidabilità delle attrezzature a pressione*, pp. 447-458, Cagliari, 2008.

[2] G. Mulè: “Guida alla scelta e dimensionamento delle valvole di sicurezza e dei dischi di rottura”, Associazione Italiana di Ingegneria Chimica, Milano, 2005.

[3] Decreto Ministeriale 1° dicembre 2004, n.329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all’articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93”.

[4] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 “Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione”.

[5] Decreto Legislativo 27 settembre 1991, n. 311 “Attuazione delle direttive n. 87/404/CEE e n. 90/488/CEE in materia di recipienti semplici a pressione”.

[6] Decreto Direzione Generale Sanità 10 agosto 2005, n. 12544 “Linee guida regionali in applicazione del D.M. 1/12/2004, n. 329 in materia di attrezzature a pressione”.

[7] Lettera Circolare ISPESL 7 febbraio 2005, n. 3/05.

[8] Norma UNI EN 764-7 “Attrezzature a pressione - Sistemi di sicurezza per attrezzature a pressione non esposte a fiamma”.

[9] Norme UNI EN 4126-1-2-3-4-5-6-7 “Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrapressioni”.

[10] Norma UNI EN 13136 “Impianti di refrigerazione e pompe di calore - Dispositivi di limitazione della pressione e relative tubazioni - Metodi di calcolo”.

[11] API Recommended Practice 520 Part I & II “Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries”.

[12] API Recommended Practice 521 “Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems”.

APPENDICE A
Modulo Analisi dei Rischi

eni polimeri europa	**Modulo MNP 52434 rev. 0 del 27/09/05** **ANALISI DEL RISCHIO** **Fascicolo Tecnico per Realizzazione di Attrezzature a Pressione secondo il D. Lgs. n. 93/00 (direttiva PED)** (rif. Guida Tecnica DT/2 del 15.01.2005)	**N. PROGRESSIVO**	
		N. FOGLIO	
		REVISIONE	
		DATA	
		WBS	
		PAGINA	

- IL PRESENTE MODULO PER L'ANALISI DEL RISCHIO DEVE ESSERE COMPILATO IN ACCORDO ALLA GUIDA TECNICA DT/2 DEL 15/01/2005.
- NEL CASO IN CUI L'ATTREZZATURA IN PRESSIONE SI COMPONGA DI PIÙ CAMERE SEPARATE, VERRÀ DATA INDICAZIONE DEL NUMERO DELLE CAMERE E LORO DESCRIZIONE NEGLI APPOSITI SPAZI (ES. CAMERA1/LATO TUBI - CAMERA2/ LATO MANTELLO PER SCAMBIATORI DI CALORE). IN QUESTO CASO L'ANALISI VERRÀ DIFFERENZIATA CAMERA PER CAMERA PER I PUNTI GIÀ SDOPPIATI IN TABELLA E PER EVENTUALI ALTRI PUNTI CHE DOVESSERO RICHIEDERLO.
- DEVE ESSERE COMPILATO UN MODULO SEPARATO PER CIASCUNA ATTREZZATURA.

DESCRIZIONE BREVE: TUBAZIONE/SCAMBIATORE DI CALORE/SERBATOIO/ECC.

1	Descrizione dell'attrezzatura a pressione	Item/Nome	
		Reparto	
		Descrizione	
		N° Camere	
		• Camera 1	
		• Camera 2	
		Schema di Marcia	
2	Pressione di progetto interna	Quali accorgimenti sono stati adottati per evitare il superamento della pressione di progetto?	
	2.1 Camera 1		
	2.2 Camera 2		
3	Temperatura max e min di progetto	Quali accorgimenti sono stati adottati per evitare il superamento della temperatura di progetto?	
	3.1 Camera 1		
	3.2 Camera 2		
4	Pressione statica e massa del fluido	Qual è la massima pressione statica raggiungibile e quale il peso del fluido contenuto nell'attrezzatura? Come viene sorretta?	
	4.1 Camera 1		
	4.2 Camera 1		
5	Forze e momenti di reazioni vincolari	Quali sono i carichi applicati a flange e bocchelli? (sono noti? si deve fare riferimento alle norme VSR, VSG, ME?) Quali sono le reazioni vincolari dei sostegni? Si prevedono valori diversi da quelli indicati dai fabbricanti di attrezzature esistenti o da costruire? Sono previste azioni dei sostegni gravose, per es. dovute a carichi derivanti da altre attrezzature o strutture che gravano su quella in oggetto?	
6	Corrosione	Il fluido è corrosivo? Esiste il pericolo di corrosione galvanica o da correnti parassite? Qual è il sovra spessore di corrosione previsto? Esistono materiali che per esperienza hanno dato buoni risultati? Quali altri accorgimenti sono previsti?	
	6.1 Camera 1		
	6.2 Camera 2		

7	Erosione	Esiste erosione? Qual è il sovra spessore previsto? Sono previsti altri sistemi o materiali idonei ad evitare / contenere tale fenomeno? (p. e. rivestimenti in materiale duro).	
	7.1 Camera 1		
	7.2 Camera 2		
8	Fatica dei materiali , sollecitazioni dinamiche	Esistono sollecitazioni cicliche (carichi pulsanti, fluttuazioni periodiche della pressione)? Quanti e quali cicli sonoprevisti? Esiste il pericolo di urti dall'interno o dall'esterno?	
9	Fluidi contenuti	Quali sono le loro caratteristiche chimico fisiche e tossicologiche (nome, stato fisico, tensione di vap. a tmax, frasi di rischio)?	
	9.1 Camera 1	nome	
		stato fisico in esercizio	
		tens. vap a tmax	
		frasi di rischio	
		gruppo ped (1-2)	
	9.2 Camera 2	nome	
		stato fisico in esercizio	
		tens. vap a tmax	
		frasi di rischio	
		gruppo ped (1-2)	
10	Decomposizione di fluidi instabili	Sono chimicamente stabili i fluidi contenuti nell'attrezzatura?	
11	Frequenza degli avviamenti/ fermate	Quante fermate / avviamenti annui sono previsti? Esistono pericoli di danneggiamento in queste fasi?	
12	Gradienti termici	Esistono condizioni di dilatazioni termiche differenziali rilevanti? (es: se la tmax è > 50 °C e la lunghezza di una linea è > 50 m, dilatazioni differenziali tubi / mantello per scambiatori di calore, gradienti dovuti a condizioni variabili nel tempo, ecc.).	
13	Colpo di ariete	Esiste? Di che entità è il fenomeno? Come ovviarvi?	
14	Rottura fragile	Sono previsti accorgimenti se l'attrezzatura deve essere impiegata a bassa t? (p. es. materiali resilienti).	
15	Reazioni chimiche incontrollate	Esiste questo pericolo? Quali effetti può avere? Quali soluzioni adottare? (p. es. organi di controllo e/o protezione).	
16	Incendio esterno	Esiste questo pericolo? Quali sono gli effetti e cosa è previsto per evitarli?	
17	Fuori uscita di fluido di processo durante operazioni di esercizio	Esiste questo pericolo? Quali sono gli effetti? Come ovviarvi (p. es. procedure operative o altro)?	
18	Emissioni fuggitive per fluidi tossici	Cosa è previsto per contenere / eliminare questo fenomeno? (p. es razionalizzazione di valvole e accoppiamenti flangiati, certificazioni contro le emissioni fuggitive, procedure di campionamento, ecc.).	
19	Rischio di scottature per contatto con elementi dell'attrezzatura	Esiste? Cosa è previsto per ovviarvi?	
20	Installazione e manutenzione	Sono previsti rischi durante queste operazioni? cosa è previsto per ovviarvi (p. es. procedure di sicurezza, coordinamento lavori, istruzioni di manutenzione che il fabbricante deve fornire)?	
21	Contatto/mescolamento tra i fluidi contenuti in camere diverse	Esiste questa pericolo? Quali effetti può avere? quali soluzioni sono state adottate?	
22	Sistemi antincendio	Sono presenti squadre antincendio in impianto? Esiste un sistema antincendio nell'area di installazione? Esiste un sistema antincendio proprio dell'attrezzatura? Descrivere il sistema antincendio.	
23	Eventuali carichi dovuti a vento, neve e sisma	Sono presenti? Cosa è stato previsto per tenerne conto?	
24	Verifiche interne di integrità dell'attrezzatura	Sono previste? Di quale tipo? Con quale frequenza?	
25	Ulteriori sistemi di protezione non menzionati ai precedenti punti	Descrivere.	
26	Altro	Descrivere.	

APPENDICE B
Modulo foglio di calcolo valvola di sicurezza

eni polimeri europa	Foglio Dati Strumenti Valvole di Sicurezza	COMMESSA	FOGLIO
		IMPIANTO / LINEA	PAGINA
			1 di 3
	MODULO A	DATA	REVISIONE
			0

DATI DELLA VALVOLA DI SICUREZZA			
Sigla			
Tipo (VS = Valvola di sicurezza, VSB = Valvola di sicurezza bilanciata)			
Installata su			
A protezione di			
Pressione di scatto	P =		barg
Contropressione imposta	p_{bs} =		barg
Contropressione generata	p_{bg} =		bar
Contropressione dichiarata	p_b =		barg
Perdita di carico tra attrezzatura protetta e dispositivo di sicurezza	ΔPi =		bar
Pressione di taratura al banco	Pt =		barg
Sovrappressione (percentuale della pressione di taratura)	o =		%
NOTA Nel caso di PSV bilanciate, la pressione di taratura al banco (Pt) è uguale alla pressione di scatto P, ossia la contropressione imposta (Pbs) non ha effetto			

DATI DELL'ATTREZZATURA A PRESSIONE PROTETTA			
Descrizione dell'attrezzatura			
Pressione operativa	PO =		barg
Temperatura operativa	TO =		°C
Pressione massima ammissibile	PS =		barg
Temperatura massima ammissibile	TS =		°C
È richiesto il collaudo PED?		☐ SI	☐ NO
Categoria / modulo PED dell'attrezzatura protetta		I	

DATI GENERALI DI CALCOLO (RIFERITI ALLA CONDIZIONE GOVERNANTE)			
Natura del fluido (indicare i componenti principali)			
Stato fisico di efflusso	◉ GAS O VAPORE SECCO ○ VAPORE ACQUEO UMIDO ○ FASE MISTA ○ LIQUIDO		
Pressione di scarico	p_s =		barg
Pressione critica termodinamica	p_c =		bara
Pressione di scarico ridotta (p_r/p_c)	p_r =		
Temperatura di scarico	T_o =		°C (*)
Temperatura critica termodinamica	T_c =		°C (*)
Temperatura di scarico ridotta (T_o/T_c)	T_r =		
Fattore di comprimibilità (vedere EN-ISO 4126-7:2004 - Figura 1)	Z =		
Massa molecolare	M =		kg/kmol
Esponente isentropico (rapporto dei calori specifici Cp/Cv)	k =		
Portata dimensionante in fase vapore	Q_m =		kg/h
Causa della portata di scarico dimensionante			
Altre cause considerate e relative portate			
	Q_{1m} =		kg/h
	Q_{2m} =		kg/h
	Q_{4m} =		kg/h
	Q_{5m} =		kg/h

REV.	DESCRIZIONE	DATA	COMPILATO	VERIFICATO	APPROVATO

(*) NOTA BENE: il rapporto To/Tc viene effettuato in automatico considerando i valori di To e Tc in K

eni polimeri europa	**Foglio Dati Strumenti Valvole di Sicurezza**	*COMMESSA*	*FOGLIO*
		IMPIANTO / LINEA	*PAGINA*
			2 di 3
	MODULO B	*DATA*	*REVISIONE*
			0

CAUSE DI SOVRAPPRESSIONE

- ☐ ERRORE DI MANOVRA
- ☐ APERTURA VALVOLE DI NON RITORNO
- ☐ MANCANZA ENERGIA ELETTRICA
- ☐ MANCANZA ACQUA DI RAFFREDDAMENTO
- ☐ MANCANZA ARIA STRUMENTI
- ☐ MANCANZA VAPORE
- ☐ MANCANZA COMBUSTIBILE
- ☐ MANCANZA GAS INERTE
- ☐ ROTTURA TUBI IN SCAMBIATORI
- ☐ COLPO DI ARIETE
- ☐ INCENDIO ESTERNO
- ☐ MANCANZA DI FLUIDO ASSORBITORE
- ☐ IMMISSIONE DI SOSTANZE
- ☐ GUASTO DI UNO STRUMENTO
- ☐ ESPLOSIONE INTERNA
- ☐ REAZIONE CHIMICA
- ☐ ESPANSIONE DI LIQUIDO
- ☐ ALTRO (SPECIFICARE)

INCENDIO ESTERNO

SIGLE RECIPIENTI PROTETTI	CONTENUTO (infiammabile o non, liquido o vapore)	QUANTITÀ	ELEVAZIONE DEL FONDO SUL PIANO BASE INCENDIO	COINVOLTO DA (solo per i non infiammabili)	SUPERFICIE TOTALE ESPOSTA	SUPERFICIE DI CALCOLO	F (fattore di isolamento termico)
		[kg]	[mm]	Sigla	S = [m²]		

DATI DI CALCOLO

F =		
S =		m²
L =		kJ/kg

Per una spiegazione più dettagliata, consultare la Procedura "Descrizione del Foglio Dati per Valvole di Sicurezza"

Metodo secondo Norme API RP 521

◉ Flusso termico standard $Q_m = 255600 \cdot \frac{F \cdot S^{0.82}}{L} =$ _____ kg/h

○ Flusso termico ridotto $Q_m = 155160 \cdot \frac{F \cdot S^{0.82}}{L} =$ _____ kg/h

ROTTURA TUBI IN UNO SCAMBIATORE

Specificare il metodo di calcolo utilizzato

$Q_m =$ _____ kg/h

DILATAZIONE DI LIQUIDO

DATI DI CALCOLO

B =		1/K
H =		kJ/h
C =		kJ/(kg·K)

Approccio semplificato secondo Norme API RP 521

$Q_m = B \cdot H / C =$ _____ kg/h

NOTE

eni polimeri europa	**Foglio Dati Strumenti Valvole di Sicurezza**	*COMMESSA*	*FOGLIO*
		IMPIANTO / LINEA	*PAGINA*
			3 di 3
	MODULO C	*DATA*	*REVISIONE*
			0

EFFLUSSO GASSOSO

DATI DI CALCOLO		
Q_m =		kg/h
K_d =		
$K_{dr}=K_d \cdot 0.9$=		
k =		
C =		
p_o =		bar a
T_o =		K
Z =		
M =		kg/kmol
v =		m^3/kg
x =		
p_b =		bar a
K_b =		
p_{bc} =		bar a
Flusso =		

CALCOLO DELL'ORIFIZIO (approccio semplificato secondo Norme EN ISO 4126-1:2004)

- Scarico in flusso critico di gas, vapori e vapore acqueo secco:

$$A=\frac{Q_m}{0.2883 \cdot K_{dr} \cdot C} \cdot \sqrt{\frac{v}{p_o}} = \frac{Q_m}{K_{dr} \cdot C \cdot p_o} \cdot \sqrt{\frac{Z \cdot T_o}{M}} = \_\_\_\_\_ \text{ mm}^2$$

- Scarico in flusso critico di vapore acqueo umido ($x \geq 90\%$):

$$A=\frac{Q_m \cdot \sqrt{x}}{0.2883 \cdot K_{dr} \cdot C} \cdot \sqrt{\frac{v}{p_o}} = \_\_\_\_\_ \text{ mm}^2$$

- Scarico in flusso subcritico di gas, vapori e vapore acqueo secco:

$$A=\frac{Q_m}{0.2883 \cdot K_{dr} \cdot K_b \cdot C} \cdot \sqrt{\frac{v}{p_o}} = \frac{Q_m}{K_{dr} \cdot K_b \cdot C \cdot p_o} \cdot \sqrt{\frac{Z \cdot T_o}{M}} = \_\_\_\_\_ \text{ mm}^2$$

EFFLUSSO LIQUIDO

DATI DI CALCOLO		
Q_m =		kg/h
K_d =		
$K_{dr}=K_d \cdot 0.9$=		
K_v =		
ρ =		kg/m³
μ =		cP
Re =		
p_o =		bar a
p_b =		bar a

CALCOLO DELL'ORIFIZIO (approccio semplificato secondo Norme EN ISO 4126-1:2004)

- Scarico di liquidi non vaporizzanti:

$$A=\frac{Q_m}{1.61 \cdot K_{dr} \cdot K_v} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot (p_o - p_b)}} = \_\_\_\_\_ \text{ mm}^2$$

Area calcolata per Kv=1	A"=	mm^2
Area selezionata per Kv=1	A'=	mm^2
Kvmin = A"/A'	Kvmin =	
Numero di Reynolds per A'	Re =	
Nuovo valore di Kv	Kv=	
Verifica	Kv>Kvm?	

EFFLUSSO BIFASICO

CALCOLO DELL'ORIFIZIO (specificare il metodo di calcolo utilizzato)

A = _____ mm²

☐ Norme API 520 Appendice D (Metodo "omega") ☐ Somma delle aree (preliminare) ☐ Altro metodo (specificare)

DIAMETRO ORIFIZIO		mm
AREA ORIFIZIO		mm²
TIPO DI DISPOSITIVO (*)		
CATEGORIA / MODULO PED DEL DISPOSITIVO DI SICUREZZA	/	
PN INGRESSO		
DN INGRESSO		
PN USCITA		
DN USCITA		
MATERIALE CORPO (**)		
MATERIALI ESCLUSI		
ACCESSORI PARTICOLARI (***)		

(*) Valvola di sicurezza: standard, bilanciata, pilotata, di sfioro, per gas e vapori, per fluidi corrosivi, con disco di rottura a monte, con disco di rottura a valle;
Valvola pilotata: automatica, con energia ausiliaria, etc.

(**) Deve essere idoneo per la temperatura T_o e per quella risultante dopo l'espansione.

(***) Con leva di sollevamento, con linea di lavaggio, incamiciata, con sede guarnita, etc.

Verifiche a campione sull'idoneità dei dispositivi di sicurezza posti a protezione delle tubazioni esistenti denunciate in accordo all'art. 16 del D.M.329/04

*G. Sferruzza**
*G. Canale** - G. Cevasco***
*F. Sabatini****

** ISPESL, Dipartimento di Palermo*
*** Istituto Italiano della Saldatura*
**** Raffineria di Gela*

1. PREMESSA

L'emanazione del Decreto Ministeriale n°329 del 01/12/2004 ("regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzo delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del D.Lgs. n°93 del 25/02/2000") [1], portando a termine il processo di recepimento della Direttiva PED, ha cambiato le norme relative alla messa in servizio ed all'utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi, ampliando il campo di applicazione rispetto alla normativa previgente, inserendone anche i Recipienti per Liquidi e le Tubazioni, compresi quelli in esercizio alla data di entrata in vigore del decreto e non certificati secondo il D.Lgs. 93/2000 [2]e mai assoggettati ad omologazioni o controlli di legge.

È da ricordare che fino alla data di entrata in vigore del DM 329/04 l'art. 241 del D.P.R. 27 aprile 1955 n. 547 poneva l'obbligo a carico dei costruttori di recipienti e tubazioni soggetti a pressione di liquidi, gas o vapori esclusi o esonerati dall'applicazione delle norme di sicurezza previste dalle leggi e dai regolamenti speciali concernenti gli impianti ed i recipienti soggetti a pressione, di realizzarli secondo la "regola dell'arte" con attestazione finale del possesso dei necessari requisiti di resistenza e di idoneità all'uso cui erano destinati, senza rimando ad alcuna norma tecnica.

I grandi stabilimenti industriali, nella quasi totalità dei casi, hanno affidato le loro commesse ai costruttori di recipienti per liquidi e tubazioni prescrivendone la conformità a norme internazionali riconosciute quali ad esempio API e ASME.

L'art. 35 del D. Lgs. 626/04, oggi abrogato dal D. Lgs 81/08, per l'esercizio di dette attrezzature, non rientranti nell'Allegato XIV, poneva a carico del Datore di Lavoro di mettere in atto le misure necessarie per installarle e farle utilizzare correttamente in conformità alle istruzioni d'uso e sottoporle a idonea manutenzione al fine di garantire nel tempo l'affidabilità e, in caso di riparazione, di trasformazione o manutenzione, affidare a personale qualificato in maniera specifica per svolgere tali compiti.

Tra le novità più importanti introdotte dal D.M. 329/04 è da evidenziare il contenuto dell'art. 16 che pone a carico degli Utilizzatori l'obbligo di denunciare all'ISPESL le tubazioni e recipienti per liquidi, rientranti per caratteristiche tecniche tra quelle che individuano le condizioni di obbligatorietà alla riqualificazione periodica, mai assoggettate a verifiche periodiche di legge perché escluse dalla normativa previgente.

La Raffineria di Gela, sensibile alle problematiche di sicurezza e ambientali, si è adoperata per ottemperare a quanto prescritto dall'art.16 del D.M. 329/04 in relazione alla denuncia di tutte le tubazioni e i recipienti per liquidi presenti negli impianti, rientranti nel campo di applicazione, non soggetti a precedenti obblighi di legge.

Per semplificare i compiti degli Utilizzatori l'ISPESL ha emanato la Lettera Circolare Prot. A00-09/0005411/08 del 10/11/2008 [3] con la quale sono state fornite precisazioni ed indicazioni in merito alla procedura per l'applicazione dell'art. 16 del Decreto Ministeriale n° 329/04.

La lettera circolare suddetta evidenzia, in particolare, le seguenti precisazioni e responsabilità a carico dei soggetti interessati:

- la denuncia, la documentazione trasmessa e quella indicata in riferimento dall'Utilizzatore assumono valore di "Verifica di integrità" dell'attrezzatura (art. 10 comma 2 lettera a) del D.M. 329/04);
- il verbale del sopralluogo eseguito dell'ISPESL assume valore di prima "Verifica di funzionamento";
- la Verifica di funzionamento, eseguita dall'ISPESL, costituisce per le attrezzature denunciate una Verifica di riqualificazione periodica di funzionamento definita all'art.10 comma 2 lettera b) del D.M. 329/04;
- la valutazione positiva della denuncia, della documentazione trasmessa e di quella indicata in riferimento e la Verifica di funzionamento eseguita dall'ISPESL attuano l'intervento di Riqualificazione periodica previsto all'art. 16 comma 3 del D.M. 329/04.

Ai fini della presente memoria è da evidenziare, altresì, che l'Utilizzatore tra i dati obbligatori da indicare nella denuncia, oltre quanto prescritto ai punti a), b) e c) del comma 2 dell'art. 16 del D.M. 329/04, deve fornire indicazioni dei dispositivi di sicurezza relativi all'attrezzatura denunciata (da menzionare esclusivamente per la loro identificazione).

A seguito della denuncia e della relativa valutazione positiva sulla completezza della documentazione allegata il sopralluogo di verifica da parte ISPESL prevede nel complesso i seguenti puntuali accertamenti:

- individuazione delle attrezzature denunciate e delle loro condizioni di esercizio;
- controllo a campione della presenza delle documentazioni dichiarate nella denuncia;
- identificazione e funzionalità degli accessori di sicurezza denunciati;
- eventuali tarature degli accessori di sicurezza relativi alle attrezzature denunciate.

Risulta evidente che l'idoneità degli accessori di sicurezza posti a protezione è di esclusiva responsabilità dell'Utilizzatore/Datore di Lavoro in quanto nella denuncia è tenuto anche a dichiarare che l'attrezzatura denunciata risulta protetta nei confronti del rischio di sovrappressione.

La presente memoria vuole illustrare un approccio utilizzato per la verifica dell'idoneità delle PSV poste a protezione delle attrezzature denunciate dalla Raffineria di Gela, che è stato elaborato dal Dipartimento ISPESL di Palermo in collaborazione con la Raffineria di Gela e con l'ausilio tecnico dell'Istituto Italiano della Saldatura.

2. IDONEITÀ DEGLI ACCESSORI DI SICUREZZA

Per i pericoli connessi all'industria di processo ed in particolare a quelli connessi al superamento della pressione di progetto di attrezzature sottoposte a pressione, si adottano provvedimenti ingegneristici di prevenzione o di protezione. In quest'ultima categoria rientrano le valvole di sicurezza (PSV – Pressure Safety Valve) che, fondamentalmente, hanno lo scopo di sfogare all'esterno l'eccesso di energia che si può generare nei diversi processi e viene trasferita al fluido contenuto nelle attrezzature. In conseguenza a ciò, il sistema di protezione deve essere calibrato in modo tale da aprirsi ad valore predeterminato di pressione e dimensionato in modo tale da bilanciare i fattori che tenderebbero a determinare, all'interno del componente, un aumento di pressione in funzione della temperatura (dP/dT) positivo, ovverosia lasciando fuoriuscire la quantità di fluido sufficiente a provocare un dP/dT uguale e negativo. Si tratta, in altre parole, di bilanciare il volume di gas o vapori generato nell'unità di tempo nel recipiente con la portata volumetrica scaricata attraverso il dispositivo di sicurezza.

Le fasi logiche, fra loro dipendenti, attraverso le quali si deve procedere nel dimensionamento del dispositivo di scarico, si possono così riassumere:

- Individuazione del volume da porre sotto protezione della PSV
- Individuazione di tutte le possibili anomalie che possano provocare un aumento della pressione oltre i valori di progetto e conseguente scelta della pressione di scatto della PSV (o di altro dispositivo di sicurezza)

- Determinazione delle condizioni di efflusso (monofase gas o liquido o bifase) e calcolo della portata da scaricare
- Esame delle condizioni a valle del dispositivo di scarico
- Determinazione del procedimento di calcolo idoneo al tipo di flusso e conseguente valutazione della portata specifica di scarico
- Calcolo della sezione di efflusso
- Progettazione, se necessario, dell'eventuale convogliamento (blow-down).

3. LA SITUAZIONE NELLA RAFFINERIA DI GELA

Presso la Raffineria di Gela sono installate circa 1500 PSV. In occasione della denuncia delle attrezzature mai assoggettate a precedenti omologazioni o controlli di legge, sono state individuate e citate nella denuncia circa 800 PSV concorrenti alla protezione delle attrezzature denunciate. La quasi totalità delle PSV citate nella denuncia erano già poste a protezione di apparecchiature che erano precedentemente assoggettate a controlli di legge; a seguito della denuncia esse sono oggi preposte anche alla protezione di attrezzature denunciate; in pratica solo 15 PSV sono poste a protezione esclusiva di attrezzature denunciate.

La situazione è riassunta nella Tabella 1 sottostante.

Gruppo PSV	DESCRIZIONE	N. PSV	NOTE
A	PSV installate in raffineria	1500	
A1	PSV citate nella denuncia	765	
A1-a	PSV citate nella denuncia già a protezione di attrezzature sotto controllo ISPESL	750	
A1-b	PSV citate nella denuncia a protezione esclusiva di attrezzature denunciate	15	

Tabella 1

4. CRITERIO DI SELEZIONE DELLE VALVOLE DI SICUREZZA DA VERIFICARE

In termini generali, a seguito della denuncia, le 765 PSV citate nella denuncia stessa (Gruppo A1) richiederebbero una verifica di dimensionamento: infatti le PSV del Gruppo A1-a erano state originariamente dimensionate per la protezione di una apparecchiatura sotto controllo di legge ma non per la protezione concomitante di altre attrezzature a pressione (linee in particolare); le PSV del Gruppo A1-b richiedono il dimensionamento in quanto fino ad oggi non soggette a verifiche di legge.

Visto l'elevato numero di PSV suscettibili di verifica di dimensionamento si è valutata la possibilità di elaborare un criterio di selezione che consentisse di individuare un campione significativo di PSV selezionato fra le PSV considerate più "critiche" dal punto di vista della verifica di dimensionamento stessa e nel contempo di limitare il numero di verifiche da effettuare.

Per quanto concerne le PSV del Gruppo A1-b esse sono state verificate al 100% (15 PSV).

Per quanto concerne le PSV del Gruppo A1-a il criterio si è imperniato su una valutazione ponderata delle linee incidenti sulle apparecchiature protette dalle PSV. La valutazione ponderata ha tenuto conto dei seguenti fattori:

- numero di linee incidenti
- dimensioni delle linee per diametro

in tal modo è stato possibile stimare qualitativamente i volumi posti a protezione delle PSV ed individuare una classifica di criticità identificando le PSV più critiche dal punto di vista della verifica di dimensionamento.

Si è infine proceduto a selezionare fra queste un campione di circa il 10% delle PSV citate nella denuncia.

Le verifiche di dimensionamento sono pertanto state condotte su 76+15 PSV. Di seguito sono riportati alcuni degli impianti verificati con il relativo n° di linee incidenti e il diametro medio delle stesse

Topping 1 PSV verificate		
PSV	**N° linee**	**Diam. Medio (")**
3	1	8
38	2	8
39	3	8
40	2	8
41	2	8
101F	13	10
103F	2	6
181CC1	1	6
190	1	4
191	2	6
192	5	12
193	3	10
101E	54	10

COKING 2 PSV verificate		
PSV	**N° linee**	**Diam. Medio (")**
101	35	14
653	1	4
654	30	10
658	1	6
659	1	4
660	10	8
661	4	10
662	3	8
666	2	6
686	2	6
695	2	4
1401	5	8

DESOLFORAZIONE GASOLIO PSV verificate		
PSV	**N° linee**	**Diam. Medio (")**
101NA	13	8
101NB	13	8
104NB	6	8
106	4	8
108NB	3	6
109	14	8
159A	14	8
159B	14	8
159C	14	8
122NA	5	6
122NB	5	6
125N	3	4
157	5	8

DESOLFORAZIONE FLUSSANTI PSV verificate		
PSV	**N° linee**	**Diam. Medio (")**
1	16	10
7	2	6
19	4	8
13	3	6
14A	2	10
17	3	8
20	1	6
NSV1	11	12

5. METODO DI VERIFICA DEL DIMENSIONAMENTO

Il dimensionamento della sezione di efflusso di una PSV viene generalmente condotto verificando più "cause dimensionanti". Pertanto viene verificato lo scenario relativo all'incendio ma anche altri scenari quali ad esempio condizioni anomale di esercizio. Viene così individuata la causa dimensionante e sulla base di essa si procede alla verifica di dimensionamento.

In caso di incendio apparecchiature e linee di impianto possono essere direttamente esposte al fuoco. L'esposizione delle pareti esterne dei componenti può causare un aumento incontrollato della temperatura del fluido contenuto all'interno delle apparecchiature e delle linee, con conseguente aumento della pressione interna e rischio di sovrapressione. La verifica del corretto dimensionamento di una PSV in caso di incendio consiste nell'accertare che la PSV in oggetto, in caso di sovrapressione dovuta ad incendio e conseguente apertura della valvola stessa, sia correttamente dimensionata per smaltire la portata disponibile di fluido proveniente non solo dall'apparecchiatura sulla quale la PSV è installata ma anche dalle linee insistenti sull'apparecchiatura stessa.

Per le verifiche del dimensionamento delle PSV nel caso di incendio si è fatto riferimento alla norma API RP 520 Sez. 5 "Relief Requirements for vessel exposure to fire" [4] che definisce la procedura di calcolo appropriata.

Come detto la verifica deve essere condotta tenendo conto dell'esposizione al fuoco sia delle apparecchiature che delle linee ad esse collegate.

Per quanto concerne le apparecchiature viene definita la "Superficie esposta al fuoco - S": essa rappresenta l'area, in m2, della superficie esterna dell'apparecchiatura inclusa in una altezza di almeno 8 metri al di sopra di ciascun piano sul quale possono accumularsi le sostanze infiammabili; nel caso di sfere, "S" rappresenta l'area della superficie esterna della sfera inclusa fra il piano di calpestio e la quota in corrispondenza del diametro orizzontale o la quota di 8 metri (la maggiore delle due). Se l'apparecchiatura si trova ad una distanza inferiore a 7 metri da apparecchiature o componenti infiammabili, nella superficie "S" deve essere inclusa la porzione di superficie dell'apparecchiatura esposta alla radiazione.

Per quanto concerne il contributo delle linee che insistono sull'apparecchiatura protetta dalla PSV in oggetto, la verifica è stata condotta secondo l'approccio guidato dalla norma API RP 521 (e ripreso dalla "Guida alla scelta e dimensionamento delle valvole di sicurezza e dei dischi di rottura " Giuseppe Mulè AIDIC – ISPESL [5]), che prevede di sommare alla superficie bagnata della (o delle) apparecchiature protette dalla PSV oggetto della verifica, una percentuale dell'area stessa per tener conto del vapore generato nelle linee insistenti sull'apparecchiatura. Considerati le dimensioni tipiche (sviluppo lineare e diametri) delle linee degli impianti in oggetto, è stato selezionato un valore pari al 10% dell'area della superficie esposta al fuoco delle apparecchiature.

Alla luce di quanto sopra esposto, le PSV la cui causa dimensionante non era l'incendio e quindi in teoria non coinvolte in questa fase di verifica, ma una condizione anomala di esercizio, sono state comunque sottoposte ad una analisi come di seguito esplicitato.

Per ogni PSV è stato comunque calcolato il contributo dato dal piping, in ossequio a quanto sopra esposto, per la "causa incendio" e si è verificato se la nuova portata, così calcolata, risultasse ancora minore della portata utilizzata nel dimensionamento originale della valvola (con-

dizione anomala di esercizio). Nel caso non si dimostrasse così, si è proceduto ad un ricalcolo della PSV nelle nuove condizioni operative.

Ulteriori fondamentali parametri operativi che sono stati verificati dalla documentazione disponibile sono i seguenti:

- Pressione di taratura molla
- Pressione di scatto (Pressione di taratura molla + contropressione) ove tale valore è relativo alle valvole che, essendo prive di soffietto, scaricano nella rete di Blow-down; per le PSV dotate di soffietto, o scaricanti in atmosfera, i due valori di pressione coincidono.

6. RISULTATI DELLE VERIFICHE E MISURE CORRETTIVE

Nella Tabella 2 seguente sono riportati i risultati della verifiche di dimensionamento condotte su 75 PSV. Come si evince dai dati esposti solo 2 PSV hanno dato esito negativo (corrispondenti al 2.5%); sono infatti risultate sottodimensionate per lo smaltimento del volume di riferimento.

Per tali PSV è stata approntata la pratica per la loro sostituzione in tempi brevi con altre di caratteristiche idonee.

A valle delle verifiche effettuate ed al fine di integrare lo studio in atto la Raffineria di Gela ha deciso di estendere lo studio su un campione che interessi il 25% delle PSV denunciate.

I risultati possono essere così tabellati:

IMPIANTO	*IDONEA PER IL SERVIZIO*		*NON IDONEA PER IL SERVIZIO*	
COKING 2	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
101	*x*			
653	*x*			
654			*x*	*4" x N x 6"*
658	*x*			
659	*x*			
660	*x*			
661	*x*			
662	*x*			
666	*x*			
686	*x*			
695	*x*			
1401	*x*			
DESOLFORAZIONE GASOLIO	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
101NA	*x*			
101NB	*x*			
104NB	*x*			
106	*x*			
108NB	*x*			
109	*x*	*x*		
159A	*x*	*x*		
159B	*x*	*x*		
159C	*x*	*x*		
122NA	*x*			
122NB	*x*			
125N			*x*	*2" x G x 3"*
157	*x*			
RECUPERO GAS	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
322	*x*			
323	*x*			
324	*x*			
325	*x*			
G26	*x*			
413	*x*			
427	*x*			
G28	*x*			
G2	*x*			
ACIDO SOLFORICO	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
101	*x*			
102	*x*			

IMPIANTO	*IDONEA PER IL SERVIZIO*		*NON IDONEA PER IL SERVIZIO*	
TOPPING 1	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
3	*x*			
38	*x*			
39	*x*			
40	*x*			
41	*x*			
101F	*x*			
103F	*x*			
190	*x*			
191	*x*			
192	*x*			
193	*x*			
101E	*x*			
181CC1	*x*			
SWS 1	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
202	*x*			
DESOLFORAZIONE FLUSSANTI	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
1	*x*			
7	*x*	*x*		
19	*x*			
13	*x*			
14A	*x*			
17	*x*			
20	*x*			
NSV1	*x*			
HDS	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
1104	*x*			
1109	*x*	*x*		
5001	*x*			
TEXACO	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
G1	*x*			
G3	*x*			
CLAUS	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
101	*x*			
MOTORFUEL	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
K1EBT	*x*			
R102	*x*			
112	*x*			
103	*x*			
G7	*x*			
102	*x*			
G19	*x*			
G20	*x*			
COKING 1	*CASO INCENDIO*	*ALTRA CAUSA*	*CASO INCENDIO*	*PSV SUGGERITA*
E55-T	*x*			
25	*x*			
301-F	*x*			
E6-T	*x*			
TOTALE PSV ANALIZZATE	*PSV IDONEE (%)*		*PSV NON IDONEE (%)*	
76	*97.4*		*2.6*	

7. CONCLUSIONE

Il Dipartimento ISPESL di Palermo e la Soc. Raffineria di Gela, con l'ausilio tecnico dell'Istituto Italiano della Saldatura, hanno affrontato la problematica sorta in occasione della denuncia secondo art. 16 del DM 329/04, relativa alla protezione nei confronti del rischio di sovrappressione delle attrezzature denunciate e, in particolare, del corretto dimensionamento degli organi

di protezione nel momento in cui vengono a concorrere alla protezione delle linee denunciate, incidenti sulle apparecchiature protette da PSV.

È stato elaborato un criterio di verifica a campione del dimensionamento delle PSV, effettuando la verifica di dimensionamento su circa il 10 % delle PSV suscettibili di verifica e **ritenute più critiche**.

Il criterio si è imperniato su una valutazione ponderata delle linee incidenti sulle apparecchiature protette dalle PSV. La valutazione ponderata ha tenuto conto dei seguenti fattori:

- numero di linee incidenti
- dimensioni delle linee per diametro

in tal modo è stato possibile stimare qualitativamente i volumi posti a protezione delle PSV ed individuare una classifica di criticità individuando le PSV più critiche dal punto di vista della verifica di dimensionamento.

Su un insieme di 75 PSV verificate la quasi totalità è risultata correttamente dimensionata. Solo 2 PSV sono risultate non idonee e sono state oggetto di una pratica di sostituzione in tempi brevi.

Si ritiene che l'approccio adottato costituisca un riferimento valido, che può essere replicato volontariamente anche in altri contesti, per affrontare la problematica in oggetto rispettando gli aspetti legati alla sicurezza degli impianti e tenendo conto delle indubbie difficoltà legate all'elevato numero di PSV suscettibili di verifica.

8. BIBLIOGRAFIA

1 Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004 – Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n.93.

2 D. Lgs. N° 93 del 25/02/2000 – Attuazione della Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione.

3 Lettera Circolare ISPESL prot. A00-09/0005411/08 del 10/11/2008.

4 API RP 520 Sez. 5 "Relief Requirements for vessel exposure to fire"

5 "Guida alla scelta e dimensionamento delle valvole di sicurezza e dei dischi di rottura " Giuseppe Mulè AIDIC – ISPESL

Fenomeni di degrado per esercizio ad alte temperature su acciai ad alto tenore di NiCr

A. Alvino - D. Lega**
V. Mazzocchi - A. Rinaldi**
*F. Giacobbe***
**ISPESL Dipartimento Tecnologie di Sicurezza*
***ISPESL Dipartimento di Messina*

SOMMARIO

Gli impianti di steam reforming, utilizzati per la produzione di idrogeno, operano normalmente a temperature comprese tra gli 850-900°C e sono realizzati impiegando acciai ad alto tenore di Ni e Cr, appositamente progettati per operare in condizioni di temperature elevate, garantendo un'opportuna resistenza a fenomeni di degrado strutturale.

Il presente studio è stato condotto su tubi della sezione radiante del forno catalitico per la produzione di idrogeno, dove si registrano le condizioni più gravose del processo. Le tubazioni impiegate sono in lega a matrice austenitica, classificabile come HP grade con tenori di Ni e Cr pari al 35% ed al 25% rispettivamente. Sono stati analizzati campioni di materiali eserciti per tempi compresi tra le 85.000-95.000 h.

Mediante una mirata indagine metallografica ed un'analisi microstrutturale, sia al microscopio ottico che al SEM, lo studio ha permesso di individuare e localizzare le diverse forme di danneggiamento correlate alla tipologia di metallurgia ed alle particolari condizioni ambientali di esercizio. Il degrado strutturale dei materiali è stato evidenziato su scala macroscopica dai risultati delle prove meccaniche di tipo distruttivo, in cui si registra un marcato peggioramento delle caratteristiche meccaniche, con perdita di resistenza e duttilità.

1. INTRODUZIONE

Il mercato attuale richiede combustibili per autotrazione sempre più a basso tenore di zolfo, pertanto gli impianti di raffinazione (es. hydrofining) hanno necessità di quantità notevoli di idrogeno.

Tale processo è di tipo endotermico (con assorbimento di calore) e consiste nella conversione catalitica di una miscela di idrocarburi leggeri con vapore d'acqua in presenza di catalizzatore (a base di nickel) secondo la seguente reazione endotermica:

$$C_n H_m + n H_2O \rightarrow n CO + (m/2 + n)H_2 \qquad (1)$$

Dunque in uscita si ottiene un composto gassoso di sintesi ricco in idrogeno (H_2 compreso tra il 65%÷75%), in cui sono presenti monossido di carbonio (CO compreso tra il 12%÷15%) ed altre impurità (CH_4 e CO_2).

Successivamente il processo produttivo prevede uno o più livelli di pulizia del gas di sintesi prodotto nel reattore di reforming, progettati per convertire il metano in monossido di carbonio ed il monossido di carbonio in anidride carbonica - attraverso le reazioni (2) e (3) -

con conseguente produzione di ulteriore idrogeno.

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3\,H_2 \quad (2)$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (3)$$

Poiché le reazioni risultano complessivamente endotermiche, il processo richiede l'apporto di calore.

Il reattore è costituito da tubi riempiti con il catalizzatore in una camera di combustione nella quale viene iniettato e bruciato il combustibile che fornisce il calore necessario a far avvenire la reazione . Il forno è del tipo "top fired": la carica entra nei tubi catalitici dall'alto ottenendosi così uno scambio di calore in equicorrente tra i fumi all'esterno ed il gas di processo all'interno dei tubi catalitici. Due sono le qualità fondamentali che deve possedere una buona fornace:

1. Il trasferimento di calore dai bruciatori ai tubi catalitici ed alla miscela che passa all'interno di questi ultimi deve essere reso più efficiente possibile (potenzialità di depositi superficiali che riducono la trasmissione del calore).
2. I materiali con cui è costruita devono essere dotati di elevata resistenza alle varie forme di degrado che possono manifestarsi in questo tipo d'impianti, vale a dire scorrimento viscoso (creep), corrosione, fatica termica o carburizzazione.

I tubi catalitici sono la componente su cui va prestata la maggior attenzione nella scelta del materiale [2], in primis poiché il trasferimento di calore al fluido da trasformare avviene ad opera degli stessi ed inoltre perché le loro condizioni di esercizio sono generalmente le più inclini a far insorgere pericolose forme di danneggiamento. Gli utilizzatori, lavorando con processi a ciclo continuo, hanno interesse a mantenere in esercizio ed in sicurezza i tubi catalitici per l'intero periodo compreso tra le fermate di manutenzione programmata, e dunque mantengono sotto stretto controllo e monitoraggio i parametri che possono esaltare i fenomeni di degrado. Per quanto riguarda l'efficienza del trasferimento termico, più che la composizione chimica è il design del tubo ad essere il fattore determinante, cosicché le prestazioni migliori si ottengono con tubi centrifugati la cui superficie interna è costituita da rientranze alternate a sporgenze al fine di rendere massimo lo scambio termico tra il metallo ed il fluido all'interno del tubo.

La composizione chimica del materiale è invece fondamentale nel conferire un'adeguata resistenza ai principali fenomeni di degrado che colpiscono questi componenti.

In particolare, per i tubi catalitici impiegati in impianti di reformi*n*g, il danno più frequente è quello dovuto a scorrimento viscoso, quasi sempre causato da un locale ed eccessivo surriscaldamento del componente [3,4]. lo sviluppo di materiali dalle prestazioni più elevate quali sono gli acciai HP grade ha consentito un graduale innalzamento della temperatura massima d'esercizio (ad esempio nel processo di steam reforming all'aumentare della temperatura aumenta la produzione di idrogeno) per questo tipo di componenti, garantendo di pari passo una maggior efficienza dei processi ed una riduzione dei costi totali di produzione [5,6]. Un'altra forma assai pericolosa di danneggiamento dei materiali è la carburizzazione [7,8]: a temperature elevate ed in presenza di opportune miscele di reagenti, possono crearsi le condizioni adatte per la deposizione di coke sulla superficie interna dei tubi catalitici, fenomeno che porta all'assorbimento di carbonio nella matrice metallica oltre che ad una negativa evoluzione dello scambio termico. La conseguenza più immediata della penetrazione del C nel metallo è l'aumento di volume del materiale e del suo coefficiente di espansione: si generano dunque forti tensioni interne che portano a rotture anticipate. La carburizzazione inoltre, può alterare significativamente le proprietà meccaniche del materiale stesso, riducendo la duttilità e la resistenza al creep e favorendo così la formazione di cricche nella zona carburizzata, che poi si possono estendere al resto del materiale, con esiti catastrofici. Gli effetti macroscopici dei suddetti difetti si manifestano attraverso una deformazione geometrica (ovalizzazione) della sezione del tubo. Il controllo attraverso repliche metallografiche risulta poco efficace per individuare e classificare il livello di degrado.

2. CONFRONTO IMPIANTI E MATERIALI.

Il materiale oggetto dello studio è costituito da due tubi centrifugati provenienti da due distinti impianti (F01 e F02) in lega G-X 40 NiCrSiNb 35 25. È un acciaio per impieghi ad alte temperature, a matrice austenitica, con un elevato tenore di nichel (35%) e di cromo (25%).

Il tubo proveniente da F02 presenta piccole aggiunte di titanio. La composizione chimica nominale di entrambe le leghe è riportata in tabella 1:

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Ti	Cu	Fe
F01	0.40	1.50	1.50	25.00	35.00	1.50	-	-	Bal.
F02	0.43	1.40	1.00	25.00	35.00	1.50	var*	0.25	Bal.

* tenore compreso tra 0.05 % e 0.30 %.

Tabella 1 - Composizione chimica nominale dei materiali analizzati

Nella tabella 2 sono schematicamente illustrati i parametri di progetto e le condizioni d'esercizio dei due forni di steam reforming. Benchè entrambi siano stati costruiti per la produzione di idrogeno mediante processo di steam reforming, i due forni non si presentano del tutto identici a livello di fluido di processo e condizioni di esercizio. In particolare vi sono leggere differenze nella composizione del combustibile (carica del reattore), nella pressione e nella temperatura d'esercizio. Anche lo spessore dei tubi catalitici è leggermente diverso, come pure il loro numero all'interno della fornace e la produttività unitaria (riferita a singolo tubo catalitico). Dall'esame del numero di ore di funzionamento risulta che il forno F02 ha circa un anno di esercizio in più rispetto al forno F01.

	F01	**F02**
Tipologia forno	Tipo "top firing" ; sul tetto della sezione radiante sono posti i bruciatori; nella stessa sezione sono disposti verticalmente i tubi contenenti il catalizzatore. I fumi fuoriescono dal basso e vengono condotti nella sezione convettiva.	Tipo "top firing" ; sul tetto della sezione radiante sono posti i bruciatori; nella stessa sezione sono disposti verticalmente i tubi contenenti il catalizzatore. I fumi fuoriescono dal basso e vengono condotti nella sezione convettiva.
Bruciatori	60 bruciatori su 5 file di cui 2 esterne (lavorano al 60%) e 3 interne	60 bruciatori di cui 36 interni + 24 esterni (ridotti dimensionalmente)
Composizione della carica	benzina leggera desolforata (70%) + GPL desolforato (30%)	fuel gas di raffineria (80%) + GPL saturo o metano (20%)
Numero tubi catalitici	204 tubi catalitici posti su 4 file	176 tubi catalitici posti su 4 file
Dimensioni tubi catalitici	Ø esterno 128,3 mm Ø interno 101,6 mm	Ø esterno 124,2 mm Ø interno 101,6 mm
Materiale tubi catalitici	G-X40NiCrNb3525	G-X40NiCrNb3525
Pressione di esercizio	30 bar	25÷27 bar
Max pressione da progetto (PS)	33 bar	32,7 bar
Temperatura di esercizio prodotto (ingresso tubo catalitico)	530 °C	max 560 °C
Temperatura di esercizio prodotto (uscita tubo catalitico)	max 860 °C	max 880 °C
Max temperatura di esercizio pelle tubo catalitico	890 °C	890 °C
Max temperatura da progetto (TS) pelle tubo catalitico	955 °C	950 °C
Produzione massima di H_2	61.000 Nm^3/h	42.000 Nm^3/h
Numero di ore di funzionamento	85000 h	96000 h

Tabella 2 - Parametri di progetto e condizioni d'esercizio dei due forni di steam reforming.

In occasione dell'ultima fermata di manutenzione dell'impianto F01 (maggio 2008), tutti i tubi catalitici sono stati esaminati mediante il metodo delle correnti indotte, per monitorarne le condizioni ed individuare difetti (cricche) eventualmente presenti. In aggiunta, è stata effettuata anche una misura del diametro esterno dei tubi, mediante un dispositivo dual laser. Dall'esame ispettivo è emerso che la quasi totalità dei tubi era in buono stato ed infatti un solo tubo è stato trovato con un numero di difetti tale da raccomandarne la sostituzione. Assieme ad esso è stato comunque deciso di sostituire altri 3 tubi in quanto interessati da cricche, benchè queste ultime non fossero ancora in quantità tali da rappresentare un immediato rischio di cedimento. Tenendo presente infatti sia il rischio - seppur moderato - di rottura dei tre tubi, sia il fatto che la fermata successiva per manutenzione era prevista nel maggio 2010, si è preferito sostituire immediatamente questi tre componenti, così da evitare un eventuale intervento di manutenzione straordinaria. I tubi del forno F02 sono stati invece esaminati principalmente in funzione della loro ovalizzazione mediante lettura a mezzo laser del diametro interno. I tubi ritenuti da sostituire sono stati 18. Anche in questo caso gran parte di essi è stata sostituita a scopo preventivo, così da scongiurare il rischio di ulteriori fermate di manutenzione, oltre a quelle normalmente previste.

Sono stati analizzati in questo lavoro uno spezzone di tubo catalitico proveniente dal lotto di quelli sostituiti nel forno F01 ed un secondo spezzone proveniente da un tubo sostituito del forno F02. Per quanto riguarda l'acciaio del tubo F02, è stato inoltre possibile reperire del materiale non esercito (campione F0) in modo da effettuare un confronto delle caratteristiche microstrutturali nonché meccaniche tra materiale esercito e materiale a tempo zero. Nell'altro caso si sono utilizzate le informazioni presenti in letteratura.

3.ANALISI MICROSCOPICA.

3.1. Esame macro.

I tubi si presentano in buono stato a livello di finitura ed aspetto esteriore (non si rilevano effetti di variazione di spessore per corrosione o erosione). Assai differenti appaiono invece le condizioni della superficie interna (quella a contatto con la carica): sul tubo F01 sono state rilevate notevoli incrostazioni di coke ed un esame ad occhio nudo della sezione trasversale mostra una zona più scura che, partendo dalla superficie interna, si estende in direzione radiale per circa 1 mm, formando una sorta di anello bruno che separa la superficie interna sporca di coke dal resto del materiale, il quale appare invece del consueto colore metallico, benché leggermente opaco. Tale zona è presente lungo tutto il tubo. Il tubo F02 non mostra invece alcuna traccia né di deposizioni di coke, né di zone più scure presso la superficie interna (tale stato può essere giustificato da un più recente trattamento di pulizia).

3.2. Microscopia ottica.

Sono stati prelevati campioni metallografici dagli spezzoni di tubo e sono state analizzate sia sezioni longitudinali che radiali. E' stato fatto inoltre un confronto tra materiale esercito e non. L'esame microstrutturale è stato condotto utilizzando vari reattivi di etching in grado di mettere in evidenza le diverse fasi eventualmente presenti. I reattivi utilizzati sono stati scelti tra quelli indicati dall'ASM Handbook N° 9 per l'etching degli acciai austenitici e delle leghe usate ad alta temperatura [9].

La microstruttura del materiale non esercito è costituita da una matrice austenitica in cui sono dispersi carburi eutettici (primari) in un pattern ampiamente descritto in letteratura [10-13]. Non vi sono tracce di carburi secondari all'interno dei grani.

Il materiale esercito invece mostra chiaramente segni d'invecchiamento dovuti alla prolungata attività in esercizio ad elevata temperatura: l'esame microscopico dei campioni provenienti dal tubo F01 evidenzia infatti - eccezion fatta per la superficie esterna, che appare sostanzialmente priva di precipitati (figura 1 a) un ingrossamento dei carburi eutettici e la precipitazione anche massiccia di carburi secondari all'interno della matrice austenitica, anche essi in fase di coalescenza (figure 1 b-d) L'invecchiamento del materiale non è uniforme lungo tutta la sezione radiale del tubo, ma tende a farsi più massiccio in prossimità della superficie interna, dove la densità delle seconde fasi precipitate è così elevata che la fase austenitica è distinguibile solo con difficoltà.

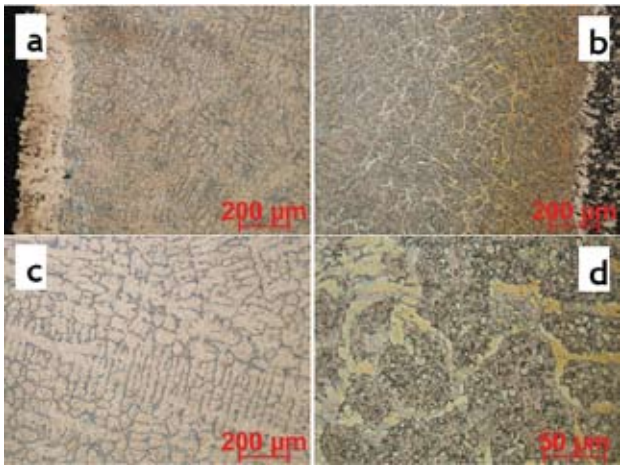


Figura 1 - Micrografie LOM di campioni provenienti dal tubo F01: a) vicino alla superficie esterna; b) vicino alla superficie interna; c) bulk; d) ingrandimento di b. Sezioni radiali.

Il tubo F02 (figure 2 a-d) presenta una struttura simile, sebbene sia i carburi primari che quelli all'interno della fase austenitica abbiano dimensioni più ridotte; l'aggregazione delle seconde fasi è più discontinua e meno pronunciata, lasciando ipotizzare un invecchiamento minore rispetto a quanto riscontrato sul tubo F01.

Un ulteriore particolare emerso nell'analisi al LOM delle sezioni radiali dei tubi è la presenza di una zona, localizzata in prossimità della superficie interna, la cui microstruttura ha un aspetto differente dalla consueta matrice austenitica circondata da seconde fasi precedentemente descritta. Il tubo F01 mostra in tale area un avanzato stato di degrado (figura 1 b): la matrice originaria è andata completamente perduta ed al suo posto è presente uno strato irregolare di materiale dalla struttura porosa e fessurata che si estende per quasi 1 mm verso l'interno del tubo e che, come è stato descritto nell'esame macro, date le sue dimensioni è facilmente visibile anche ad occhio nudo sotto forma di un anello di colore scuro. Anche i campioni provenienti dal tubo F02 presentano una microstruttura diversa dal bulk in corrispondenza della superficie interna (figura 2 b); in questo caso il materiale presenta uno strato superficiale compatto, spesso un centinaio di Qm, simile per aspetto alla fase austenitica, dalla quale però si differenzia in quanto privo della ragnatela di carburi che abitualmente accompagnano quest'ultima in questa tipologia di acciai.

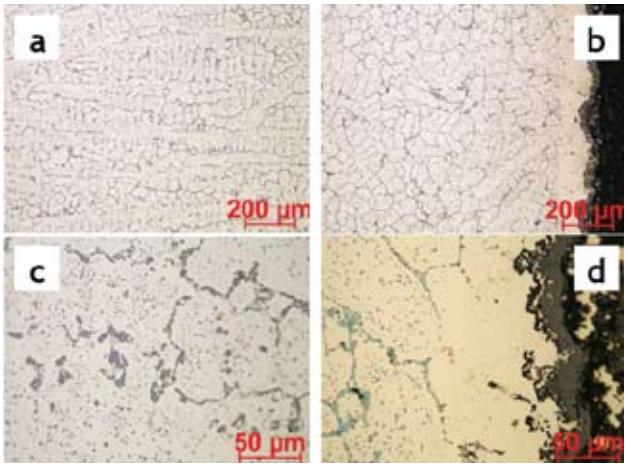


Figura 2 - Micrografie LOM di campioni provenienti dal tubo F02: a) vicino alla superficie esterna; b) vicino alla superficie interna; c) bulk; d) ingrandimento di b. Sezioni radiali.

3.3. Microscopia elettronica.

L'analisi mediante microscopia elettronica a scansione dei campioni provenienti dai tubi studiati ha permesso di individuare con precisione le varie fasi presenti nel materiale, determinandone la composizione chimica mediante microsonda EDX. Cavità, microfessurazioni e altre forme di danneggiamento sono state altresì osservate nei materiali eserciti.

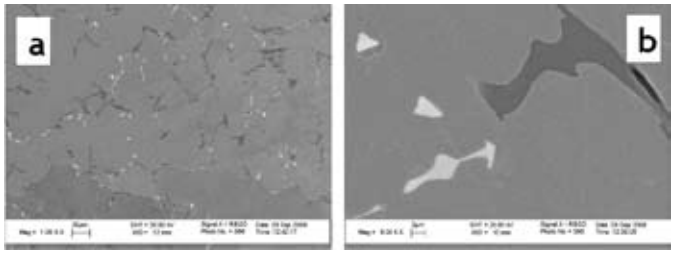


Figura 3 - Immagini SEM BSE a differenti ingrandimenti di campioni di materiale F0. Sezioni radiali.

Il materiale del campione F0 (che sarebbe l'analogo non esercito del tubo F02) si presenta nella sua veste originaria, ovvero una matrice di austenite con una fine ragnatela di carburi eutettici (figura 3), che l'analisi EDX ha dimostrato essere formati da varie fasi, chiaramente distinguibili in base alla colorazione osservabile usando come rivelatore una sonda ad elettroni retrodiffusi (backscattered electrons, BSE). Le fasi scure sono carburi di cromo, del tipo M_7C_3[(1)] mentre quelle chiare sono carburi di niobio e titanio. Nel caso del tubo F01, il materiale non esercito avrebbe più o meno la stessa struttura di F0, con la differenza che le fasi chiare sarebbero costituite esclusivamente da carburi di niobio (la lega non contiene titanio) e il pattern reticolare delle seconde fasi apparirebbe leggermente più grossolano. Non v'è traccia di cavità o microcricche.

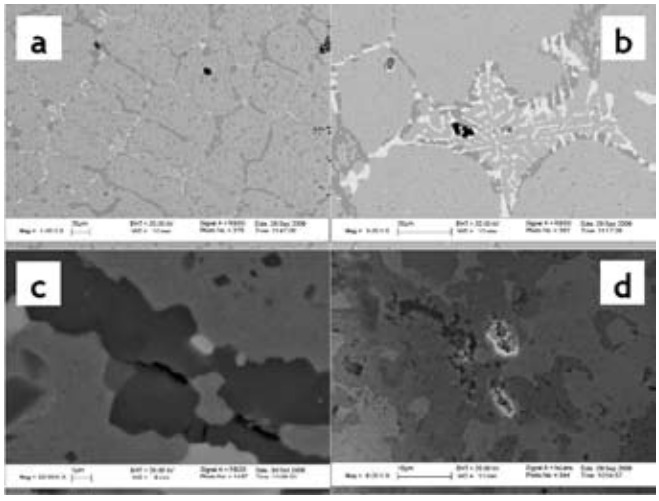


Figura 4 - Immagini SEM BSE di campioni provenienti dal tubo F01. a) bulk; b) ingrandimento di a; c) particolare di microcricche nel bulk; d) zona carburizzata vicino alla superficie interna. Sezioni radiali.

L'avanzato stato di invecchiamento strutturale del tubo F01 venuto alla luce dall'osservazione al LOM è stato confermato dall'osservazione al SEM. Carburi eutettici decisamente ingrossati e precipitazione di carburi secondari sono i fenomeni più evidenti (figure 4a e 4b). L'analisi EDX ha inoltre evidenziato l'evoluzione strutturale anche dal punto di vista chimico, dal momento che i carburi di niobio presenti nel materiale non esercito sono stati quasi del tutto convertiti in G-phase, un composto intermetallico a base di nichel, niobio e silicio la cui formazione a

temperature prossime a quelle di esercizio tipiche di questi componenti (tubi di reforming) è stata ampiamente descritta in letteratura per questo tipo di acciai [10-15].

Anche i carburi di cromo si sono trasformati, passando da una stechiometria M_7C_3 a quella tipica dei materiali eserciti, ovvero $M_{23}C_6$[(1)]. Un gran numero di cavità è presente nel bulk, unitamente a microcricche, le quali sembrano propagarsi preferenzialmente lungo le direttrici radiali, in corrispondenza dei carburi di cromo (figura 4c). Decisamente compromesso è l'aspetto del materiale in corrispondenza della superficie interna (figura 4d): l'analisi EDX mostra che la matrice austenitica è andata quasi totalmente perduta, essendo il cromo non più presente assieme a ferro e nichel, ma precipitato sotto forma di carburo. L'aspetto della microstruttura ricorda molto da vicino quello di campioni di tubi carburizzati descritti in letteratura [16] Questa porzione di materiale è chiaramente affetta da carburizzazione: cavità, microcricche e notevoli fessurazioni sono estremamente diffuse. La propagazione delle cricche avviene principalmente lungo direttrici radiali, cui segue una graduale coalescenza anche in direzione circonferenziale che porta alla progressiva corrosione ed erosione meccanica del metallo. La superficie esterna si presenta invece ricca di grosse cavità, probabilmente a causa del dissolvimento dei carburi di cromo dovuto al surriscaldamento a cui il tubo è esposto in quella porzione (a diretto contatto con i bruciatori del forno). L'unica seconda fase osservabile nella matrice austenitica in questa zona è la G-phase.

Per quanto riguarda il tubo F02, si nota una minore evoluzione microstrutturale evidenziata da un ingrossamento meno netto dei carburi primari e da una più lieve precipitazione di quelli secondari (figura 5a). Anche in questo caso l'entità del danneggiamento si fa più evidente, seppur di poco, avvicinandosi alla superficie interna del tubo, la quale, comunque, non mostra segni di particolare degrado dovuto a corrosione/carburizzazione come osservato precedentemente per il tubo F01 (figura 5b).

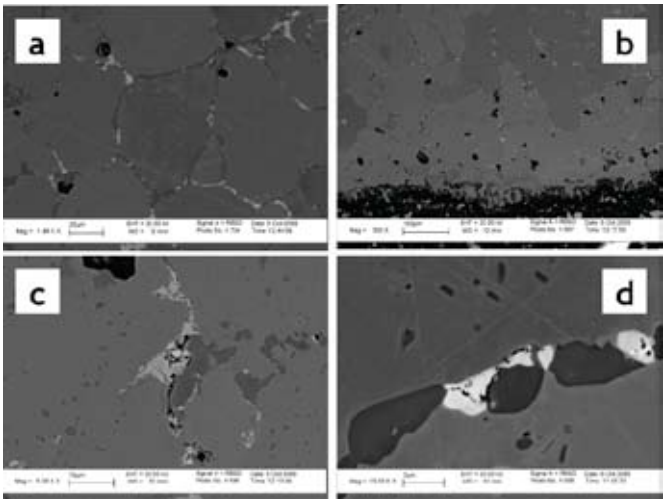


Figura 5 - Immagini SEM BSE di campioni provenienti dal tubo F02. a) bulk; b) vicino alla superficie interna; c) zona con microcricche; d) particolare di microcricche. Sezioni radiali.

L'insorgenza della G-phase è stata documentata da misure EDX, sebbene in questo materiale la trasformazione del carburo di niobio non sia quantitativa come per F01, probabilmente a causa della concomitante presenza di titanio come elemento carburigeno [10]. Sono state osservate numerose cavità sparse ed in alcuni casi allineate, lungo buona parte della sezione del tubo, con densità maggiore presso la superficie interna (figura 5b). Microcricche si dipartono in direzione radiale, privilegiando come fase di propagazione i precipitati di niobio e titanio, a differenza di quanto osservato in F01, dove erano i carburi di cromo ad esserne principalmente affetti (figure 5c e 5d).

4. PROVE MECCANICHE

Campioni di tubo sono stati sottoposti a prove di durezza Vickers usando un carico di 30 Kg secondo la norma UNI EN ISO 6507-1 (2005) [17]. Il campionamento è stato effettuato dividendo il tubo in due differenti porzioni (denominate porzione superiore e porzione inferiore) analizzando la sezione radiale, la quale è stata suddivisa in quattro settori, in ciascuno dei quali sono state effettuate otto misure (tabella 3). Ciò al fine di individuare eventuali variazioni di durezza più o meno localizzate in una particolare area. Come era prevedibile, il materiale non esercito (F0) ha mostrato valori uniformi lungo tutta la sua sezione radiale. Il suo analogo esercito F02 non ha mostrato differenze significative nè con il materiale a tempo zero, nè lungo la sezione radiale, lasciando supporre che le modificazioni strutturali dovute all'invecchiamento non hanno comportato una sostanziale alterazione di questa proprietà meccanica. Assai differente è stato il comportamento del materiale di F01: durezze apprezzabilmente più elevate si riscontrano lungo tutta la sezione radiale ed in particolare si registrano i valori massimi in corrispondenza della superficie interna del tubo, che all'esame microscopico risultava essere la più compromessa dalla precipitazione dall'ingrossamento di carburi e seconde fasi.

Per motivi di affidabilità della misura nonché di estrema fragilità del materiale, non è stato possibile effettuare misure sulla zona carburizzata.

Porzione / Tubo	superiore				inferiore			
	Supeficie esterna	Bulk 1	Bulk 2	Superficie interna	Supeficie esterna	Bulk 1	Bulk 2	Superficie interna
F01	211 ± 8	217 ± 9	216 ± 8	243 ± 10	215 ± 6	212 ± 3	217 ± 7	252 ± 5
F02	172 ± 10	170 ± 10	167 ± 10	181 ± 5	172 ± 10	163 ± 7	162 ± 6	175 ± 10
F0	179 ± 7							

Tabella 3 - Durezze Vickers 30 dei materiali testati.

Il notevole processo di degrado del tubo F01 evidenziato dai risultati delle prove di durezza è stato altresì confermato dai test di trazione, eseguiti a temperatura ambiente secondo la UNI EN 10002-1 (2001) [18], a cui sono stati sottoposti alcuni provini ricavati da tale tubo. Si nota un drastico abbassamento della resistenza a trazione, accompagnato da una pressocchè nulla deformazione plastica (allungamento alla frattura assente), rispetto ai valori descritti dal costruttore per il materiale non esercito. Anche il tubo F02 ha fornito resistenze inferiori, seppur la variazione rispetto ai valori forniti dal fabbricante per il materiale a tempo zero sia meno pronunciata rispetto al tubo F01. L'aspetto delle superficie di frattura è palesemente tipico di una rottura fragile, sia nel caso di campioni provenienti dal tubo F01 che in quelli ottenuti da F02.

campione / tubo	superiore	inferiore
F01	294 ± 15	267 ± 20
F02	320 ± 22	339 ± 10

reference	
G 4852	470
G 4852 micro	470

Tabella 4 - Resistenza a trazione (N/mm^2) dei materiali testati (a sinistra) e valori forniti dal fabbricante per i medesimi a tempo zero (a destra).

5. CONCLUSIONI

Le osservazioni svolte su entrambi i materiali eserciti evidenziano un danneggiamento tipico da creep nei campioni esaminati, in relazione alla presenza di numerose cavità, in taluni casi allineate, e di microcricche (i tratti di tubo in esame durante l'esercizio erano sottoposti a temperature di pelle intorno ai 850÷880 °C). E' stato inoltre riscontrato un generale invecchiamento del materiale causato dalla precipitazione di carburi secondari e dalla coalescenza e dall'ingrossamento della rete di carburi eutettici. Anche la progressiva trasformazione delle seconde fasi presenti nel materiale a tempo zero in carburi a differente stechiometria ($M_{23}C_6$) e la formazione di composti intermetallici come la G-phase portano a concludere che i materiali esaminati hanno

subito un notevole processo di invecchiamento e degrado strutturale. A ciò si accompagna un generalizzato danno da creep, evidenziato da cavitazione e formazione di microcricche. L'evoluzione microstrutturale è stata sicuramente più massiccia nel tubo F01, il quale peraltro mostra lungo la superficie interna, a contatto col fluido di processo, un evidente processo di carburizzazione, mentre in F02 il fenomeno più marcato sembra essere la cavitazione.

È presumibile che le leggere differenze riscontrate nei parametri di processo, nelle tipologie di carica impiegata e nella produttività dei due impianti da cui provengono i tubi possano avere giocato un ruolo chiave nel determinare l'insorgenza e l'entità delle particolari forme di danno che si sono manifestate nei componenti studiati. Allo stesso insieme di fattori possono essere ascritte anche le differenze nella composizione e nella struttura cristallina del materiale che si è venuto a creare in corrispondenza della superficie interna dei tubi, cosicché per il tubo F01 il processo di ossidazione/corrosione e carburizzazione ha portato alla formazione di uno strato poco coerente, mentre sulla superficie interna del tubo F02 si è sviluppato un film di minor spessore di struttura estremamente diversa ma comunque più compatta.

Al fine di compiere uno studio quanto più completo su questa categoria di materiali e componenti sono al momento in corso ulteriori analisi su zone sensibili (saldature). Sono inoltre previste misure con altre tecniche d'indagine i cui risultati potranno essere sommati e confrontati con quelli al momento ottenuti.

6. RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare la Raffineria di Milazzo e la Linde Gas Italia (impianto di Milazzo) per aver fornito i campioni oggetto del presente studio, il sig. Antonio Di Loreto per la preparazione dei campioni, il sig. Ubaldo Iglio per l'esecuzione delle prove meccaniche e la professoressa Silvia Licoccia del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma Tor Vergata per aver cortesemente messo a disposizione degli autori il microscopio a scansione.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Renner, H.J.; Marschner, F.; Catalytic reforming of natural gas and other hydrocarbon. in: Elvers, B.; Hawkins, S.; Ravenscroft, M.; Rousaville, J.F.; Schulz G. (Eds.), Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, vol. A2, 5th ed., VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Germany, 1985, pagg. 143-242, esp. 186–204.
2. Le May, I.; Da Silveira, T.L.; Vianna, C.H. "Criteria for the evaluation of damage and remaining life in reformer furnace tubes". *Int. J. Pres. Ves. & Piping.* 1996 vol. 66 p. 233-241.
3. Schillmoller, C.M. "Solving high temperature problems in oil refineries and petrochemical plants" *Chemical Engineering*, 1986; vol. 93. p. 83-87.
4. Swaminathan, J.; Guguloth, K.; Gunjan, M.; Roy, P.; Ghosh, R. "Failure analysisand remaining life assessment of service exposed primary reformer heater tubes" *Eng. Fail. Anal*. 2008; 15: 311-331.
5. Parks, S.B.; Schillmoller, C.M "Use alloys to improve ethylene production" *Hydrocarbon Proc*. 1996, vol.75 p. 53-60.
6. Hendrix, D.E. "Cast tube alloy performance in an ethylene pyrolisis test heater" *Mater. Perform.* 1999, vol. 38, p. 66-71.
7. Grabke, H.J. "Carburization, a high temperature corrosion phenomenon", No 52 St louis, MO Materials technology Institute of the Chemical Process Industries Inc. 1998.
8. Shindo M.; Nakajima, H. "Effects of carburization and aging on tensile properties*" J. Nucl. Mater.* 1987; vol. 144 p. 20-28.
9. ASM Handbook 2004 N° 9 Metallography and Microstructures. 2004 ASM International.
10. De Almeida, L.H.; Ribeiro, A.F.; Le May, I. "Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes" *Mater. Charact.* 2003 vol. 49 p. 219-229.
11. Barbabela, G.D.; De Almeida, L.H.; Da Silveira, T.L.; Le May, I. "Role of Nb in modifying the

microstructure of heat-resistant cast HP steel" *Mater. char.* 1991; vol. 26 p. 193-197.

12. De Almeida Soares, G.D.; De Almeida, L.H.; Da Silveira, T.L.; Le May, I. "Niobium addition in HP heat resistant cast stainless steels" *Mater. Charact.* 1992 vol. 29 p. 387-396.
13. Ibañez, R.A.P.; De Almeida Soares, G.D.; De Almeida, L.H.; Le May, I. "Effects of Si content on the microstructure of modified-HP austenitic steels" *Mater. Charact.* 1993 vol. 30 p. 243-249.
14. Voicu, R.; Andrieu, E.; Poquillon, D.; Furtado, J. ; Lacaze, J. "Microstructure evolution of HP40-Nb alloys during aging under air at 1000 °C" *Mater. Charact.* 2009 vol. 60 p. 1020-1027.
15. Ribeiro, A.F.; Tavares Borges, R.M.; De Almeida, L.H. "Phase transformation in heat resistant steels observed by Stem. (NbTi)C – NiNbSi (G-Phase)" *Acta Microscopica* 2002 vol. 11 p. 59-63.
16. Da Silva, I.C.; Da Silva, R.S.; Rebello, J.M.A.; Bruno, A.C.; Silveira, T.F.; "Characterization of carburization of HP steels by non destructive magnetic testing" *NDT&E International* 2006 vol. 39 p. 569-577.
17. UNI EN ISO 6507-1 (2005) Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method (ISO 6507-1:2005).
18. UNI EN 10002-1 (2001) Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature.

NOTE

(1) Identificazione ottenuta con misure di diffrazione di raggi X non riportate in questo lavoro ma costituenti parte integrante di un'altra memoria presentata in questo congresso.

Failure analysis di un tubo piolinato prelevato da una caldaia a biomasse vegetali

M. De Marco - E. Ferrari**
R. Grandicelli - C. Servetto**
**Istituto Italiano della Saldatura*

1. INTRODUZIONE

L'Istituto Italiano della Saldatura opera da decenni nell'ambito degli impianti petrolchimici e di generazione di energia elettrica offrendo servizi di assistenza tecnica, diagnostica, 'risk based inspection (RBI)' e 'fitness for service'. Avvalendosi del proprio Laboratorio della Sede di Genova, una delle attività di consulenza riguarda anche le analisi di danno (failure analysis) di componenti soggetti, durante il loro servizio, a meccanismi di corrosione, fatica, creep, stress corrosion cracking o legati ad anomalie quali surriscaldamenti o sollecitazioni anomale. I risultati di tali indagini sono organizzati nell'ambito di un data-storage continuamente aggiornato, specificatamente concepito per l'ottimale tracciabilità e gestione, anche statistica, dei dati. Il data-storage Criteria, di cui si è dotato IIS, è strettamente correlato alle attività di RBI volte ad identificare i meccanismi di danno potenzialmente attivi sui diversi impianti. Le analisi di danno riguardano, oltre a componenti di impianti chimici, petrolchimici e di caldaia, anche altre tipologie di componenti appartenenti al settore meccanico, navale e ferroviario, elementi di carpenteria, tubazioni per il trasporto di acqua e prodotti alimentari.

Spesso, per risalire alle cause del danneggiamento vengono richieste competenze multidisciplinari, dal corrosionista, al metallurgista, allo strutturista e i diversi settori dell'Istituto (ingegneria di processo, laboratorio, ingegneria strutturale) cooperano nello svolgersi delle attività.

Nel presente lavoro vengono illustrate, a titolo di esempio, le attività condotte nell'ambito di una failure analysis di un tubo piolinato appartenente al serpentino di generazione vapore di una caldaia a biomasse vegetali, interessato da una rottura occorsa dopo circa 30 giorni dalla messa in servizio dell'impianto. Sulla base dei risultati di analisi metallografiche, di prove di scorrimento viscoso e di analisi numeriche ad elementi finiti, in cui è stato simulato il comportamento a creep del materiale, è stato possibile stabilire le cause della rottura del tubo, dovuta a fenomeni di surriscaldamento localizzato.

2. CRITERIA: IL DATA-STORAGE IIS NELL'AMBITO DELLA FAILURE ANALYSIS

I casi esaminati dall'Istituto negli ultimi 10 anni sono organizzati in un archivio dinamico (figura 1) con lo scopo di rendere agevole la ricerca di casi analoghi, già affrontati in passato, nonché di monitorare, per i casi relativi a componenti di raffineria sottoposti ad attività di Risk Based Inspection, i meccanismi di danno attivi sui vari impianti.

L'immagazzinamento e la successiva gestione dei dati premette un'analisi anche statistica delle risultanze delle indagini, rendendo possibili valutazioni quali, ad esempio, la ripetibilità di un evento in determinate condizioni di esercizio o l'individuazione di concause altrimenti non rilevabili.



Fig. 1 – Il database IIS "Criteria"

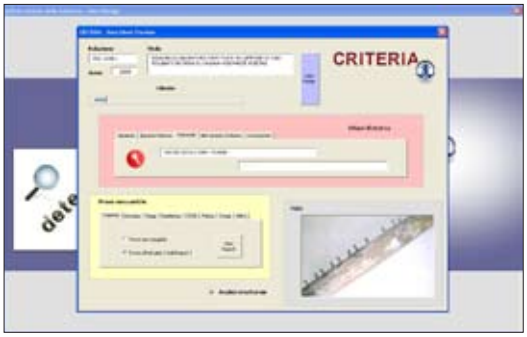


Fig. 2 – La scheda riassuntiva di un caso di failure

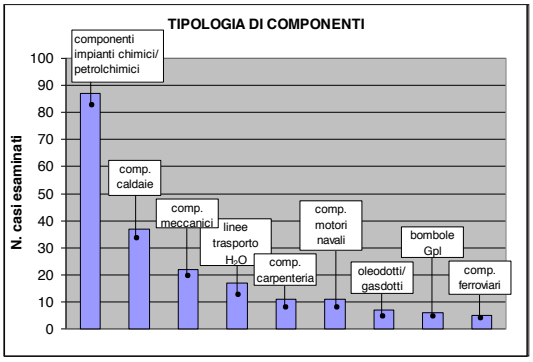


Fig. 3 – Casi di failure compresi nel database

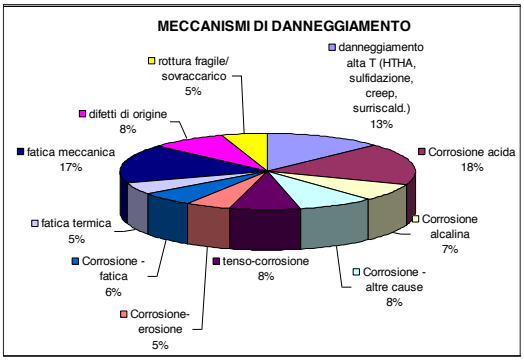


Fig. 4 – Meccanismi di danneggiamento riscontrati

La ricerca nel database è organizzata per parole chiave facenti riferimento al tipo di danneggiamento, tipo di componente, materiale, tipo di impianto e raccomandazioni finali. Per ogni caso esaminato è possibile visualizzare una maschera riassuntiva con le informazioni principali del caso di failure analizzato (figura 2).

Ad oggi i casi inseriti nel database sono circa 200 e riguardano in gran parte componenti di raffineria e di caldaia (figura 3), anche se non sono trascurabili le analisi di danno relative a componenti meccanici (parti di macchina, motori navali). In figura 4 sono rappresentati i meccanismi di danneggiamento riscontrati.

3. ILLUSTRAZIONE DI UN CASO DI FAILURE ANALYSIS

Il caso in esame riguarda un campione di tubo (figura 5) prelevato dal serpentino di generazione vapore di una caldaia a biomasse vegetali, oggetto di una rottura dopo appena 30 giorni dalla messa in servizio dell'impianto. Oltre alle consuete indagini di tipo metallografico, volte ad individuare le cause della rottura, sono state condotte anche alcune prove di scorrimento viscoso allo scopo di simulare le modalità di rottura occorse, in relazione alle temperature raggiunte e ai tempi in cui si è manifestata la rottura. Dalle informazioni acquisite dall'esercente il serpentino era stato interessato da una diminuzione di flusso che aveva potuto determinare un innalzamento della temperatura; tuttavia risultava di particolare importanza per il cliente stabilire se il danneggiamento era dovuto ad un surriscaldamento prolungato (attribuibile ad un'errata conduzione della caldaia) o, viceversa, in tempi brevi a causa di un evento anomalo.



Fig. 5 - Spezzone di tubo indagato

Di seguito sono riportate le caratteristiche costruttive nominali del serpentino:

Tipologia: Tubo senza saldatura di qualità finito a caldo secondo EN 10216-2
Materiale: P235GH
Diam. est.: 76.1 mm
Spessore: 5 mm

Sul tubo sono presenti una serie di pioli saldati ad impatto aventi la funzionalità di ancoraggio di un rivestimento refrattario conduttivo tipo SiC nel lato del tubo esposto ai fumi di combustione. Il lato del tubo non esposto ai fumi era, altresì, annegato in un refrattario con caratteristiche isolanti.

Il serpentino era posto a schermo sulla parete di una camera a sezione circolare nella quale il calore veniva generato mediante combustione di biomasse vegetali in un letto fluidizzato (ved. schema in figura 6).

Le caratteristiche di progetto del serpentino sono:

T_{prog}: 255° C
P_{prog}: 42 bar

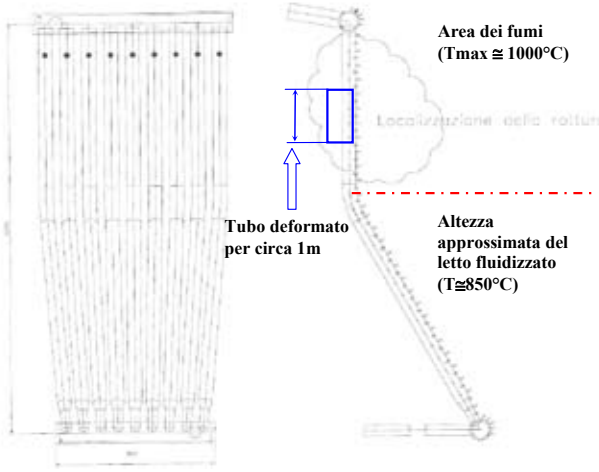


Fig. 6 - Schema del serpentino di generazione del vapore e localizzazione della rottura

La temperatura in prossimità della zona del letto fluidizzato (Fig. 6) è pari a circa 850°C mentre nella parte alta della camera i fumi sono caratterizzati da una temperatura massima pari a circa 1000°C.

La presenza del refrattario conduttivo a base SiC è riscontrabile sovente in impianti di que-

sta tipologia ed ha la specifica funzione di proteggere i tubi metallici dall'ambiente presente nella camera di combustione in termini di temperatura e aggressione chimica dei fumi stessi.

Dopo circa 30 giorni di esercizio, in corrispondenza della parte alta del serpentino a contatto con i fumi di combustione, si sono verificate alcune perdite di vapore in differenti tubi. Nelle aree laddove si sono concentrate le perdite di fluido, per un'altezza pari a circa 1m (Fig. 6), i tubi si sono vistosamente deformati e rigonfiati.

La disponibilità di un campione di tubo della stessa fornitura ma mai esercizio ha permesso di condurre esami comparativi (esami micrografici e misure di durezza) e prove di scorrimento viscoso per la successiva simulazione numerica del danneggiamento e per la stima della temperatura massima raggiunta dal tubo.

Sui campioni pervenuti al laboratorio sono stati condotti i seguenti esami.

- Esame visivo e macrografico del tubo danneggiato: ha permesso di valutare la presenza di marcate deformazioni radiali, particolarmente accentuate dal lato in cui sono presenti i pioli (corrispondente al lato fumi del serpentino) e la presenza di fessurazioni anche passanti, longitudinali all'asse del tubo ed adiacenti alla saldatura dei pioli (Fig. 7).

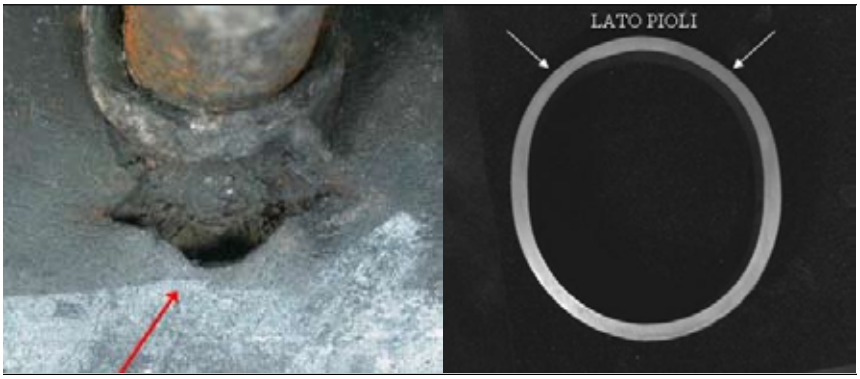


Fig. 7 – Dettaglio di una fessurazione – Sezione macrografica del tubo con marcata deformazione radiale

- Gli esami micrografici condotti sul campione di tubo danneggiato hanno evidenziato, in corrispondenza delle rotture sul lato pioli (fumi) la presenza di grani deformati e cricche intergranulari con lembi ossidati in prossimità delle rotture principali (fig. 8A); la microstruttura è risultata di tipo ferritico-perlitica con fenomeni di sferoidizzazione della perlite (fig. 8B) più marcati dal lato fumi rispetto al lato opposto fumi. E' stato inoltre rilevato uno spessore di magnetite pari a circa 80-100 μm dal lato fumi e pari a 50 μm dal lato opposto, ad evidenza del raggiungimento di una temperatura più elevata della porzione di tubo lato fumi. Le durezze sono risultate mediamente pari a 110-115 HV10, compatibili con il materiale in esame.

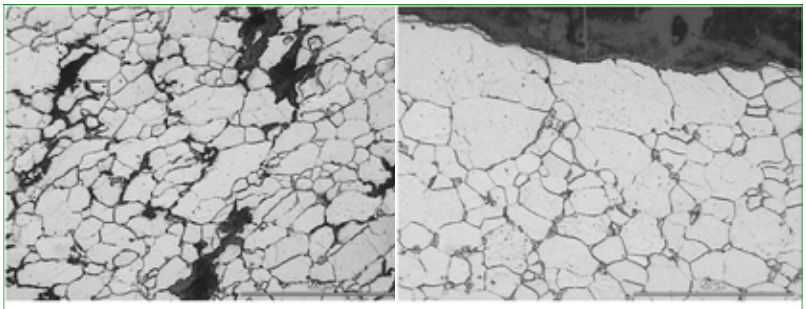


Fig. 8– Esami micrografici sul campione danneggiato, lato fumi

Gli esami condotti sul campione di tubo danneggiato permettono di attribuire le rotture occorse a fenomeni di surriscaldamento del tubo che, in condizioni di alta temperatura e sotto l'effetto della pressione interna, avrebbe accumulato una sensibile deformazione plastica permanente e diverse fessurazioni localizzate in corrispondenza dei vincoli alla deformazione stessa rappresentati dai pioli saldati ad impatto.

I fenomeni di sferoidizzazione della fase perlitica osservati e l'assenza di evidenti fenomeni ricristallizzazione microstrutturale permettono di stimare un intervallo di esposizione del materiale compreso tra circa 450°C e 720°C; l'assenza di vistosi fenomeni di ossidazione sia sulla superficie interna che su quella esterna permette di affermare come il tubo non sia stato esposto per tempi lunghi a temperature verso il limite inferiore del suddetto intervallo, ma piuttosto per una ridotta finestra temporale verso il limite superiore dello stesso. Non si può pertanto parlare di "surriscaldamento a lungo termine" quanto piuttosto di fenomeni di "surriscaldamento a medio-breve termine".

Gli esami condotti sul tubo integro mai esercito (campione 2) hanno permesso di confermare l'ipotesi di rottura e di stimare più precisamente la temperatura raggiunta dal serpentino.

- Gli esami micrografici condotti sul campione di tubo mai esercito hanno rilevato una struttura ferritico-perlitica con isole di perlite lamellare congruente con lo stato di fornitura del materiale (fig. 9A); i valori di durezza sono risultati lievemente superiori a quelli del tubo esercito (mediamente 120 HV10).
- Sono state inoltre condotte delle prove di creep (a temperature comprese tra 625°C e 700°C e tensioni dell'ordine delle tensioni agenti sul tubo), al fine di determinare il comportamento costitutivo del materiale, definendo una correlazione tra velocità di deformazione viscosa ("strain rate" $\dot{\varepsilon}$), tensione agente e temperatura di prova. E' stata in particolare utilizzata la seguente legge costitutiva:

$$\dot{\varepsilon} = C_1 \cdot \sigma^{C_2} e^{-C_3/T}$$

i cui coefficienti sono stati determinati a fronte dell'elaborazione dei risultati delle prove:
C_1 = 0.1713, C_2 = 4.4394, C_3 = 17333

Tale relazione è stata utilizzata per simulare l'incremento nel tempo delle deformazioni permanenti di creep nel componente in esame, ipotizzando il raggiungimento di differenti valori massimi di temperatura (da 600°C a 675°C) nella zona esposta ai fumi che ha evidenziato il cedimento (Fig. 10). Al modello ad elementi finiti, realizzato con l'utilizzo del codice ANSYS, è stato imposto il valore della pressione di progetto. Per ciascuna temperatura massima considerata è stato stimato il tempo necessario per determinare la rottura. I valori ottenuti variano da 388 h (≅ 15 giorni) per una temperatura massima di 600°C a 84 h (≅ 3 giorni) per una temperatura massima di 675°C.

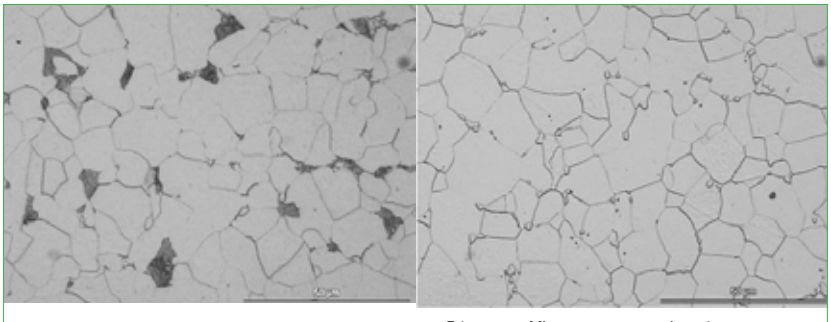


Fig. 9– Esami micrografici sul campione non esercito

Dai risultati dell'analisi si evince che le temperature massime effettivamente raggiunte dal tubo siano comprese nel suddetto intervallo (600÷675°C). Per temperature più basse, infatti, per determinare la rottura sarebbero stati necessari tempi non compatibili con il periodo di esercizio sostenuto dal componente. D'altro canto, le indagini metallografiche condotte sul saggio utilizzato per la prova di creep a 700°C, che ha determinato la rottura in circa 32 h, hanno evidenziato un'alterazione microstrutturale più marcata rispetto a quella riscontrata sul campione esercito (Fig. 9B). È di conseguenza poco plausibile che tale limite di temperatura sia stato effettivamente raggiunto.

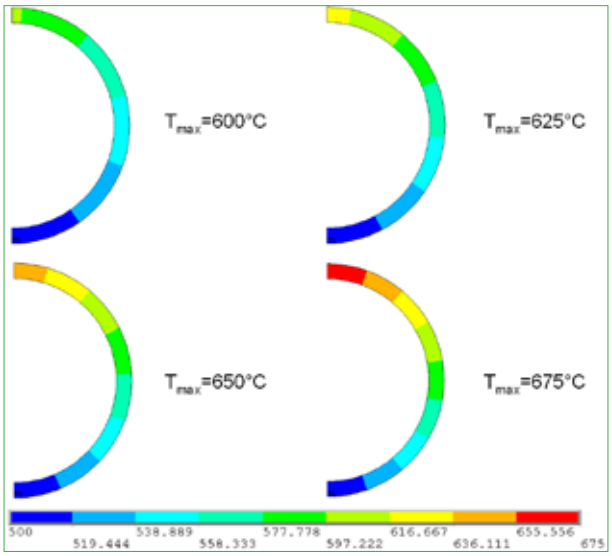


Fig. 10 – Modello strutturale ad elementi finiti del tubo: distribuzioni di temperatura ipotizzate per l'analisi

4. CONCLUSIONI

È stato presentato uno dei casi di failure analysis affrontati dall'Istituto Italiano della Saldatura, nello svolgimento del quale sono stati coinvolte le diverse competenze presenti in IIS, che hanno permesso di stabilire le cause di rottura del componente.

Alla luce delle indagini condotte le rotture occorse sul tubo esaminato, dopo appena 30 giorni dalla sua messa in servizio, possono essere associate a fenomeni di surriscaldamento del tubo che, in condizioni di alta temperatura e sotto l'effetto della pressione interna avrebbe accumulato una sensibile deformazione plastica permanente e diverse fessurazioni localizzate in corrispondenza dei vincoli alla deformazione stessa rappresentati dai pioli saldati ad impatto (fenomeni di "surriscaldamento a medio-breve termine"). Sulla base dei risultati di analisi metallografiche, di prove di scorrimento viscoso, e di analisi numeriche ad elementi finiti, in cui è stato simulato il comportamento a creep del materiale, è stato possibile stimare le temperature massime effettivamente raggiunte dal componente, che sono risultate comprese entro l'intervallo 600°C-675°C. I tempi di rottura rispettivamente calcolati sono stati pari a 388°C (≅ 15 giorni) a 600°C e 84 h (≅ 3 giorni) a 675°C; tali tempi sono di fatto compatibili con il periodo di esercizio del componente in esame.

Riparazione temporanea di attrezzature in pressione mediante applicazione di fibre di carbonio e resina

R. Balistreri*
E. Pichini**
R. Cozza*** ***- M. Serra******

** Dipartimento di Cagliari - Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro*
*** DTS - Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro*
**** SARAS – Sarroch (CA) – Ingegneria di Affidabilità*

SOMMARIO

Con l'entrata in vigore del D.Lgs. 93/2000 e l'applicazione del D.M. 329/04, oltre alle attrezzature già regolamentate dai precedenti Decreti, anche i recipienti per liquidi e le tubazioni entrano a far parte delle attrezzature che devono – obbligatoriamente - essere sottoposte a denuncia, verifiche periodiche di funzionamento e d'integrità e verifiche di riparazione.

D'altro canto il controllo e la manutenzione di tali attrezzature sono sempre stati di tutto interesse per gli utilizzatori – specie se titolari e responsabili di impianti di una certa rilevanza – cosicché anche in assenza di prescrizioni normative e legislative e fin da prima dell'emanazione dei suddetti decreti, si sono sviluppate e diffuse alcune metodiche di riparazione che allo stato attuale potrebbero rappresentare ottimi riferimenti tecnici per ripristinare l'efficienza di recipienti per liquidi e di tubazioni quanto meno per un periodo limitato di tempo.

Il lavoro svolto e riassunto in questa memoria riguarda la valutazione di un metodo di riparazione delle tubazioni a pressione che durante l'esercizio hanno subito la riduzione dello spessore in aree non eccessivamente ampie. Nello specifico, si valuta il metodo di rinforzo della parete di spessore ridotto (per effetto di corrosione o erosione) mediante l'applicazione di un sistema composito costituito da fibre di carbonio e resina termoindurente. Questa metodologia di riparazione temporanea è standardizzata nella norma ISO/TS 24817, che non ha un equivalente nella regolamentazione tecnica nazionale sebbene una recente procedura ISPESL ne consenta l'impiego a determinate condizioni.

Il confronto tra le esperienze fatte in questi anni presso la raffineria Saras, quanto riportato nella letteratura, nelle norme internazionali e negli studi che sono stati condotti su campioni eserciti, ha avuto come sintesi la proposta di procedura di riparazione temporanea che qui si presenta.

Lo studio è di particolare interesse e attualità, e le conclusioni a cui si è giunti evidenziano come il metodo sia applicabile pur nel rispetto di specifiche condizioni al contorno.

1. I MATERIALI COMPOSITI – BREVI CENNI

Il procedimento adottato per rinforzare le membrature di attrezzature a pressione (tubazioni, recipienti etc.) là dove nella parete si è riscontrata una diminuzione di spessore, ricalca per certi aspetti la tecnica dell' "*hand lay-up*" utilizzata per la realizzazione di molti componenti in solo composito o in multistrato metallo-composito. Su uno stampo che verrà eliminato alla fine del processo, o su una membratura (metallica o plastica o ceramica...) che rimarrà all'interno, vengono applicati più strati di un "tessuto" costituito da lunghe fibre – di carbonio

o di altro materiale – ordite secondo direzioni tali da garantire al prodotto finale la resistenza richiesta. Le fibre del "tessuto" sono annegate in una matrice polimerica che, opportunamente pressata e riscaldata, indurisce e si consolida in uno strato estremamente resistente per via delle caratteristiche delle fibre che contiene, ma entro certi limiti elastico/plastico per via della struttura polimerica della matrice. La funzione strutturale è svolta principalmente dall'armatura costituita da fibre, le cui proprietà dipendono sia dalla loro natura sia dal loro carattere continuo o discontinuo; dal canto suo la matrice, di struttura omogenea, svolge funzione strutturale complementare a quella delle fibre e funzione protettiva delle stesse. Dunque i due componenti insieme uniscono le rispettive specificità e ottengono prestazioni superiori a quelle che otterrebbero ciascuna per suo conto.

Poiché di materiali compositi ne esistono tanti quanti possono essere gli abbinamenti tra fibre e matrici, e le fibre possono variare per tipo di materiale, per lunghezza, per disposizione all'interno delle matrici, saranno riportate nel seguito solo quelle informazioni ritenute indispensabili alla descrizione dei materiali utilizzati, alla definizione delle loro caratteristiche, e alla comprensione delle fasi successive del metodo di riparazione di cui tratta il presente lavoro.

Classificazione delle fibre di rinforzo

Le fibre costituiscono il rinforzo del materiale composito, a cui conferiscono resistenza meccanica, rigidità e leggerezza, e di cui determinano resistenza all'abrasione e agli agenti chimici, proprietà elettriche, proprietà termiche e proprietà chimiche.

Fibre	*Massa specifica (kg/m³)*	*Modulo elastico (MPa)*	*Rottura alla torsione (MPa)*
Poliestere	*0,400*	*8000*	*550*
Vetro	*2600*	*80000*	*2500*
Kevlar	*1450*	*140000*	*3000*
Acciaio	*7800*	*210000*	*2000*
Carbonio	*1850*	*220000*	*3000*
Tungsteno	*19200*	*350000*	*2500*
Boro	*2500*	*450000*	*3500*
Carburo di silicio	*3200*	*450000*	*2000*

Tab.1 – Caratteristiche meccaniche delle fibre di rinforzo

Esse hanno un diametro di circa 10 Qm (oltre questa dimensione le proprietà diminuiscono sensibilmente) e occupano una percentuale variabile dal 30% al 70% del volume complessivo del materiale.

Le fibre possono essere classificate secondo il tipo di sostanza costituente. Si possono perciò distinguere:

- fibre di origine organica quali Kevlar, poliammidi, poliestere ecc.
- fibre di origine minerale quali vetro, carbonio, carburo di silicio ecc.
- fibre di origine metallica quali boro, acciaio, tungsteno ecc.

Tipo di fibre	*Diametro del filamento (Qm)*	*Densità (kg/m³)*	*Modulo di elasticità (trazione) (MPa)*	*Rottura a trazione (MPa)*	*Allungamento alla rottura (%)*
Vetro	*3-30*	*2300*	*60000*	*3000*	*4,5*
Carbonio	*8*	*1800*	*400000*	*2200*	*0,5*
Boro	*100-200*	*2500*	*400000*	*3500*	*0,8*
Kevlar	*12*	*1450*	*134000*	*3000*	*4,0*

Tab. 2 - Prestazioni meccaniche (ordini di grandezza) a confronto

Una seconda classificazione riguarda la lavorazione delle fibre: in questo senso si possono distinguere fibre continue e fibre discontinue. Le prime sono destinate alla produzione dei tessuti o utilizzate in modo unidirezionale; le seconde possono essere introdotte casualmente nella matrice o destinate alla produzione dei non tessuti (*mat*).

In relazione al tipo di lavorazione delle fibre si possono avere insiemi lineari e insiemi multidirezionali.

Gli insiemi lineari, che provengono dall'unione di più fibre continue, si distinguono in:

- filo di base, insieme di filamenti elementari;
- *roving*, insieme di fili di base.

Gli insiemi multidirezionali sono una elaborazione di quelli lineari e si distinguono in:

- *mat,* insieme di fili continui o discontinui uniti da un legante solubile o insolubile nella resina (quando l'unione è meccanica si ha un non tessuto agugliato);
- tessuto, insieme di fili di base o *roving* incrociati ortogonalmente secondo una trama e un ordito; le modalità di questo incrocio caratterizzano l'armatura del tessuto (tela, ad alto modulo, unidirezionale, multidirezionale, misto).

L'alto costo delle fibre e la complessità della loro messa in opera condizionano in modo decisivo il costo del materiale composito che con esse viene prodotto.

Classificazione delle matrici

Le matrici sono quelle sostanze omogenee che, associate alle fibre, consentono al materiale composito di reagire alle sollecitazioni; costituiscono inoltre una protezione indispensabile per le fibre. Poiché la matrice rappresenta il veicolo attraverso il quale le sollecitazioni vengono trasmesse alle fibre, assume una particolare importanza la sua compatibilità con esse.

Le matrici si possono classificare in base al tipo di sostanza dalla quale sono costituite, e si possono quindi distinguere:

- matrici organiche quali resine poliesteri, resine epossidiche, resine siliconiche, ecc.
- matrici minerali quali carbonio, biossido di silicio, triossido di alluminio, ecc.
- matrici metalliche quali leghe di alluminio, leghe di nichel, leghe di titanio, ecc.

Classificazione dei materiali compositi

Se il rinforzo è il maggiore responsabile delle prestazioni meccaniche del materiale, la matrice circoscrive, quantomeno per grandi linee, il suo campo di applicazione. Costituendo un'ideale interfaccia fra fibre e ambiente di lavoro, la matrice diventa l'elemento protettivo resistente relativo a quell'ambiente specifico. In questo senso si possono distinguere:

- compositi a matrice polimerica,
- compositi a matrice minerale,
- compositi a matrice metallica.

compositi a matrice organica possono essere ulteriormente distinti sulla base della continuità o della discontinuità delle fibre del rinforzo e della tecnica esecutiva. Si hanno pertanto:

- le miscele di resina e fibre corte, generalmente utilizzate nei pezzi formati per iniezione, centrifugazione e nelle zone compresse degli stratificati;
- gli stratificati rinforzati con fibre discontinue o continue, preimpregnati e lavorati per compressione;
- gli stratificati realizzati con i tessuti preimpregnati, lavorati per compressione e destinati ai componenti ad alte prestazioni.

1.1. Compositi a matrice polimeriche

Le matrici polimeriche si suddividono in inorganiche e organiche.

I materiali compositi a matrice organica sono quelli che presentano lo spettro di utilizzo più ampio; infatti, la varietà delle resine disponibili consente di accentuare le prestazioni meccaniche e caratterizzare quelle termiche e chimiche del materiale. A ciò si associa una relativa facilità di messa in opera che gioca a favore del contenimento dei costi del prodotto finale.

Le matrici polimeriche possono essere suddivise in due classi: termoindurenti e termoplastiche; le prime, dopo la polimerizzazione, acquisiscono una struttura tridimensionale non modificabile, le seconde invece possono subire deformazioni plastiche attraverso la somministrazione di calore. Le matrici termoindurenti sono caratterizzate da una microstruttura reticolata, con

forti legami di tipo covalente presenti nelle parti che connettono le lunghe catene polimeriche. Tale microstruttura è radicalmente diversa da quella dei materiali termoplastici, che invece presentano catene polimeriche (con ramificazioni laterali o meno) connesse tra loro solo da deboli legami di Van der Waals o (in pochi casi) da legami idrogeno. Da tali differenti caratteristiche microstrutturali derivano proprietà differenti. Nel caso dei materiali termoplastici, i legami deboli tra le catene possono essere scissi mediante limitati aumenti di temperatura, quindi questi polimeri possono essere fusi e risolidificati più volte senza che subiscano degradazione (in realtà la ripetizione della fusione può a lungo termine danneggiare il materiale facendone diminuire il peso molecolare). I polimeri termoindurenti fondono a temperatura più elevata, o più comunemente si decompongono termicamente prima di fondere. Le resine termoindurenti possono essere formate una sola volta nel mentre si realizza contemporaneamente il processo di reticolazione. La resistenza meccanica è simile tra termoplastici e termoindurenti, questi ultimi però sono generalmente più rigidi e meno tenaci come illustrato in tabella 3.

Proprietà	Termoindurenti	Termoplastici
Modulo di Young (GPa)	1,3 - 6,0	1,0 - 4,8
Resistenza a trazione (MPa)	40 – 120	40 – 190
Massima temperatura di utilizzo (°C)	40 – 450	25 – 230

Tab. 3 - Confronto tra proprietà di resine termoindurenti e termoplastiche

Resine termoindurenti

Le resine termoindurenti sono abbastanza economiche e caratterizzate da una certa facilità di lavorazione, dovuta alla bassa viscosità che presentano prima della reticolazione. Il trattamento di reticolazione comporta un forte ritiro del materiale (4-8%).

Tra le resine polimeriche organiche termoindurenti, le resine epossidiche sono più costose e meno fluide a parità di temperatura (cioè più difficilmente lavorabili) delle resine poliestere. Inoltre, le resine epossidiche possono essere reticolate in più stadi, il che può essere un vantaggio rispetto alle resine poliestere, anche se la reticolazione richiede temperature più elevate (180 °C). Il pre-impregnato, solo parzialmente reticolato, può essere conservato per tempi lunghi (in frigorifero), quindi formato e trattato termicamente (*curing*) per completare la reticolazione. In questa fase di reticolazione il ritiro è piuttosto contenuto (1-5%). Le proprietà meccaniche finali dipendono dal grado di reticolazione e dalle condizioni di *curing*; con opportuni parametri di processo si possono ottenere resine più rigide e resistenti, ma anche più fragili, delle resine poliestere.

Le resine fenolformaldeidiche sono state le prime materie plastiche prodotte; d'altra parte il loro basso costo, la buona resistenza al fuoco e la caratteristica di decomporsi senza produrre troppe sostanze tossiche le rende a tutt'oggi concorrenziali come possibili matrici di compositi.

L'utilizzo delle resine poliammidiche nel caso della produzione di materiali compositi è principalmente giustificato dalla loro ottima resistenza al calore. I polimeri di questo tipo possono anche essere esposti a temperatura di 450 °C, sia pure per poche ore (il che rappresenta un comportamento eccezionale nel settore dei materiali polimerici).

Proprietà	Epossidica	Poliestere	Fenolica	Poliammidica
Densità (g/cm^3)	1,1 – 1,4	1,1 – 1,5	1,3	1,2 – 1,9
Modulo di Young (GPa)	2,1 - 6,0	1,3 - 4,5	4,4	3 - 3,1
Resistenza a trazione (MPa)	35 - 90	45 – 85	50 - 60	80 - 190
Espansione termica (10^{-6} K^{-1})	55 - 110	100 - 200	45 - 110	14 - 90

Tab.4 - Proprietà di resine termoindurenti

Resine termoplastiche

Le proprietà di alcune resine termoplastiche sono confrontate in tabella 5. Queste resine possono presentare microstruttura anche sensibilmente differente l'una dall'altra, in relazione al grado di cristallinità. Inoltre rispetto ai polimeri termoindurenti, amorfi, esse sono sovente superiori in termini di tenacità.

Proprietà	PMMA	Nylon 6,6	Policarbonato	Polipropilene	PEEK	ABS
Densità (g/cm^3)	1,2	1,1	1,1 - 1,2	0,9	1,30	1,1
Modulo di Young (GPa)	3,0	1,4 - 2,8	2,2 - 2,4	1,9 - 1,4		0,9 – 2,8
Resistenza a trazione (MPa)		60 - 70	45 – 70	25 - 38	70	17 - 42
Allungamento (%)		30 - 100	90 – 110	100 - 600		5 - 70
Espansione termica (10^{-6} K^{-1})	50 - 90	90				-
Transizione vetrosa (°C) *	90 - 105	-	150		143	
Fusione (°C) *		261	-	175	373	

Tab. 5 - Proprietà di resine termoplastiche

* La temperatura di fusione è riportata per i materiali che presentano struttura almeno parzialmente cristallina, mentre per le resine completamente amorfe è indicata solamente la temperatura di transizione vetrosa.

È opportuno sottolineare che è improprio attribuire a ciascuna delle proprietà considerate nelle precedenti tabelle un unico valore numerico. Le proprietà delle resine termoindurenti dipendono infatti dalla lunghezza delle catene polimeriche (grado di polimerizzazione) e dal grado di reticolazione. Nel caso delle resine termoplastiche, oltre al grado di polimerizzazione, gioca un ruolo fondamentale nel determinare le caratteristiche finali anche il grado di cristallinità (che a sua volta sovente dipende da come il processo di polimerizzazione è condotto, dall'uso di catalizzatori ecc.). È pertanto opportuno indicare un intervallo di valori, all'interno del quale si collocano normalmente i valori misurati su materiali di diversa provenienza.

Le temperature di transizione vetrosa e le massime temperature d'impiego di resine termoplastiche e termoindurenti sono confrontate in tabella 6.

Polimero	Cristallinità	Transizione vetrosa (°C)	Massima temperatura di utilizzo (°C)
Termoindurenti			
Poliestere	No	80 - 100	50
Epossidiche	No	120 - 180	150
Fenoliche	No	130 - 180	150
Poli-ammidiche reticolate	No	300 - 330	280
Termoplastici			
Poliammidiche (Nylon)	Si	80	125
Poli-etere-etere-chetone (PEEK)	Si	143	250
Policarbonato	No	145	125
Poliammidiche	No	270	240

Tab. 6 - Temperature di impiego di resine sintetiche

Il metodo di riparazione descritto nel presente lavoro utilizza "fasciature" di materiale composito costituito da fibre di carbonio annegate in matrici di resina epossidica (matrice polimerica organica termoindurente).

Le fibre di carbonio – il cui utilizzo ha avuto inizio circa venti anni fa nel settore aeronautico - sono caratterizzate da elevate prestazioni meccaniche, da un elevato modulo di elasticità e offrono una considerevole rigidezza; proprio per questo sono utilizzate sotto forma di tessuto o di rinforzo unidirezionale nei componenti fortemente sollecitati, mentre altre volte sono utilizzate per irrigidire gli stratificati realizzati con altre fibre.

Con le fibre di carbonio si producono tessuti unidirezionali, tessuti ibridi e tessuti multidirezionali. In relazione alle elevate prestazioni meccaniche della fibra di carbonio, i *roving* e i tessuti sono generalmente preimpregnati. Quando annegate in matrici termoindurenti, ad un'elevata resistenza alla trazione e una buona resistenza alla compressione uniscono una bassa densità.

Spesso queste fibre sono associate alle fibre di Kevlar per aumentare la resistenza dei materiali allo shock meccanico e all'abrasione.

Presentano un'eccezionale tenuta al calore in atmosfera non ossidante (2000 °C). Il loro coefficiente di dilatazione è praticamente nullo e sono discreti conduttori elettrici.

Sono infine insensibili all'umidità e agli agenti corrosivi con eccezione degli acidi ossidanti e dei metalli.

2. ESEMPI DI RIPARAZIONE DI ATTREZZATURE IN PRESSIONE MEDIANTE APPLICAZIONE DI FIBRE DI CARBONIO: L'ESPERIENZA OPERATIVA DI SARAS S.P.A.

Le attrezzature giunte prossime a fine vita per sottospessori o difetti rilevati in alcuni loro punti e giudicati inaccettabili, venivano riparate, anche temporaneamente, utilizzando metodi che prevedevano la sostituzione integrale o parziale delle membrature e/o dei componenti non idonei all'esercizio, con membrature e/o componenti dello stesso materiale di quelli d'origine e con giunzioni tramite saldatura.

In determinate circostanze, questo tipo di riparazione si è talora rivelato di difficile fattibilità, e di esecuzione rischiosa oltreché complessa e onerosa.

Principalmente per tali motivi sono state ricercate soluzioni alternative. Tra le varie tentate, la tecnica di riparazione con l'uso di tessuti in fibra di carbonio, accoppiati tramite resine epossidiche, è stata ritenuta una possibile soluzione: efficace, non particolarmente complessa, ed efficiente.

In questa memoria, si espongono i seguenti casi che espongono le potenzialità del metodo:

- Riparazione di una tubazione adibita al trasferimento di acqua di zavorra delle navi, installata nel pontile della raffineria.
- Riparazione di un recipiente per idrocarburi con presenza di cricche passanti.

2.1. Riparazione di una tubazione diametro 16" spessore 9.52 mm.

Dati di progetto della tubazione:
Pressione di progetto: 10 barg
Temperatura di progetto: 60°C
Fluido: acqua di zavorra
Materiale: API 5L Gr. B

Per la riparazione sono state utilizzate le seguenti istruzioni:

- CNR-DT 200/2004 – Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.
- CNR-DT 202/2005 – Istruzioni per interventi di consolidamento statico di strutture metalliche mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.
- ISO/TS 24817 – Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Composite repairs for pipeworks – Qualification and design, installation, testing and inspection.

Il materiale utilizzato per il rinforzo è un tessuto in fibra di carbonio di tipo bi-direzionale ad

alta tenacità accoppiato con resina epossidica (termoindurente).

Per il dimensionamento del rinforzo si è utilizzata una modellazione FEM dello strato resistente di forma tubolare. Il modello, costituito da elementi "*plate*", ha avuto come condizioni di vincolo le due ipotesi di tubo incastrato rigidamente alle estremità o libero di deformarsi.

La pressione trasmessa dal fluido allo strato resistente è stata assegnata come carico costante applicato ortogonalmente agli elementi "*plate*" e diretto dall'interno del tubo verso l'esterno. I carichi termici sono stati applicati agli elementi come gradienti di temperatura e valori costanti.

La resistenza caratteristica a trazione del materiale utilizzato è pari a 4500 MPa; la resistenza ammissibile utilizzata ai fini del calcolo è stata 1/3 di quella caratteristica, cioè 1500 MPa, senza tenere conto dei coefficienti di sicurezza dettati dalle Istruzioni CNR sopra citate.

La rete in fibra di carbonio a maglie ortogonali permette di considerare il materiale come se fosse isotropo. L'analisi strutturale eseguita è del tipo statico lineare.

Il calcolo di verifica ha ritenuto sufficiente uno strato di fibra di carbonio; si è scelto comunque, in via cautelativa, di utilizzare due strati di fibra di carbonio incrociati e uno strato di fibra di vetro avente funzione di isolamento tra la fibra di carbonio e il tubo metallico per prevenire il fenomeno della corrosione galvanica.

Infine, i materiali impiegati sono stati valutati perfettamente compatibili con il fluido e con la temperatura di progetto della linea.

Procedura di riparazione.

La procedura di intervento ha previsto le seguenti fasi principali:

- pulizia delle superfici mediante sabbiatura e sgrassaggio con solvente;
- sigillatura delle eventuali perdite mediante applicazione di resine epossidiche;
- applicazione di un film adesivo per l'ancoraggio al substrato metallico;
- applicazione di uno strato di fibra di vetro per l'isolamento galvanico, impregnato con resina epossidica;
- applicazione degli strati di fibra di carbonio in senso bidirezionale, impregnati con resina epossidica, sfalsando alternativamente gli strati per ottenere un'adeguata rastremazione dei bordi di laminazione;
- applicazione di un "sacco a vuoto" avente la funzione di compattazione e pressatura delle stratificazioni;
- ciclo di polimerizzazione (*curing*) dell'adesivo e "*postcuring*" della resina con opportuno ciclo termico, mediante resistenze controllate da sistema computerizzato;
- rimozione del sacco a vuoto dopo il raffreddamento;
- ispezione visiva finale del laminato, dell'adesione tra il laminato ed il substrato e tra il substrato e la zona vicina ad esso;
- prova idraulica;
- applicazione di vernice protettiva per migliorare la resistenza agli agenti atmosferici, ai raggi UV ed all'ambiente marino.

Questo intervento è stato valutato e ritenuto di carattere permanente, prevedendo l'adozione di ispezioni periodiche atte a garantire l'affidabilità nell'esercizio.

2.2. Riparazione di un serbatoio in acciaio al carbonio.

Dati caratteristici del serbatoio:

Pressione di progetto: 0,49 barg;
Temperatura di progetto: 180°C;
Fluido: idrocarburi contenenti alte percentuali di H_2S, acqua;
Diametro esterno: 2400 mm;
Altezza tra le linee di tangenza: 4000 mm;
Materiale base: Fe 410,2 KW UNI 5869 spessore 13 mm;
Rivestimento interno: gunite avete spessore 50 mm.

Condizioni di processo:
Temperatura massima del gas di ingresso (idrocarburi + H2S): 166°C;
Temperatura massima dell'acqua di fondo: 148°C;
Temperatura di parete: 118°C
Pressione di esercizio: 0.3 barg.

L'attrezzatura presentava cricche, di cui alcune passanti, che necessitavano urgentemente d'essere riparate. Non essendo possibile mettere l'accumulatore fuori servizio per il tempo richiesto da una riparazione tradizionale, l'impiego della tecnica di riparazione con fibre di carbonio è stata considerata una valida alternativa.

L'intervento è stato eseguito praticando i requisiti indicati nella specifica tecnica ISO/TS 24817, ritenuta più esaustiva nella definizione della valutazione dell'analisi di rischio, nella definizione del ciclo di vita della riparazione, nella qualifica del personale coinvolto nella riparazione, nei metodi d'ispezione, etc.

Verifica dei materiali impiegati.

Per la valutazione della compatibilità dei materiali impiegati, in relazione alle caratteristiche del fluido di processo del recipiente, si è dovuta valutare la temperatura di parete esterna massima raggiungibile, confrontandola con la massima temperatura d'impiego dei materiali utilizzati nella riparazione.

Inoltre è stata condotta una valutazione di compatibilità chimica tra il film adesivo e/o la resina epossidica bi-componente e gli agenti chimici del fluido interno, accettando le informazioni tecniche offerte dai produttori del film e della resina.

L'esito di queste valutazioni è stato positivo.

Verifiche meccaniche della riparazione.

Il rinforzo in fibra utilizzato prevede caratteristiche meccaniche e fisiche differenti dal substrato metallico, e in particolare presenta un coefficiente di dilatazione termica praticamente pari a zero. In questo specifico caso, considerando i valori di temperatura raggiunti durante l'esercizio, è stato necessario effettuare verifiche di due tipi: la prima nell'ipotesi che il rinforzo fosse in grado di sopportare il carico dovuto alla pressione di progetto senza la collaborazione del substrato metallico; la seconda nell'ipotesi di combinazione degli sforzi dovuta all'azione simultanea della pressione di progetto e all'azione delle differenti dilatazioni termiche del substrato e del rinforzo, ripartite tra gli stessi in conseguenza delle rispettive caratteristiche meccaniche e di spessore.

Le verifiche sono state effettuate sia per gli sforzi longitudinali sia per quelli circonferenziali, ignorando il contributo dello strato di isolamento galvanico in fibra di vetro.

È stata inoltre determinata la resistenza a taglio dell'adesione tra il substrato e la laminazione di rinforzo, verificando che fosse superiore al carico di rottura del rinforzo stesso, e in particolare confrontando:

- la sollecitazione ammissibile con quella agente sul laminato (o substrato) nel caso di sollecitazioni a trazione e
- lo sforzo di taglio corrispondente alla sollecitazione massima di rottura del laminato con lo sforzo di taglio massimo proprio del film adesivo.

In altre parole, la resistenza a trazione del laminato (fibre di carbonio) - e l'adesione del film adesivo al substrato metallico – è stato individuato come aspetto limitante dell'intero sistema.

Infine sono state effettuate le opportune valutazioni relative ai momenti derivanti dalla geometria dell'accumulatore in corrispondenza del raccordo torico dei fondi ellittici.

La procedura di riparazione adottata è del tutto analoga a quella impiegata nella riparazione della tubazione descritta precedentemente.

Uniche differenze degne di nota sono state la condizione operativa del personale durante la riparazione, che ha dovuto utilizzare idonei DPI per la prevenzione da rischi derivanti dalla presenza di H_2S e dalla mancata protezione esterna da agenti atmosferici.

Questo intervento è stato valutato di carattere temporaneo, prevedendo la sostituzione dell'apparecchio alla prima occasione utile, non oltre un anno dalla data di intervento.

2.3. Ulteriori applicazioni.

Alla luce dei risultati raggiunti, il metodo di riparazione descritto può considerarsi utilizzabile ed estendibile a molte altre applicazioni.

Citando alcuni esempi, non esaustivi, ed eventualmente prevedendo l'adozione di ulteriori strati di materiale ignifugo, questa tecnica può essere efficacemente utilizzata per la riparare tubazioni installate in aree a rischio di incendio. Può essere altresì utilizzata per riparazioni di componenti strutturali di macchine dinamiche, di strutture metalliche d'impianto o del pontile e, più in generale, in circostanze in cui la saldatura di materiali omogenei risulta di difficile applicazione.

2.4. Vantaggi e limiti.

L'adozione di fibre di carbonio nella riparazione di attrezzature a pressione, e in generale nella riparazione di elementi metallici, consente di ottenere diversi vantaggi rispetto a tecniche di riparazione tradizionali.

Tra i vantaggi si possono annoverare:

- la riduzione dei rischi connessi ad interventi manutentivi in ambienti infiammabili ed esplosivi;
- la relativamente facile reperibilità dei materiali di riparazione, poiché si è svincolati dalla forma dei componenti oggetto di intervento;
- il carattere potenzialmente permanente della riparazione;
- i costi accettabili.

Possono essere riparati i seguenti difetti:

- corrosione generalizzata;
- corrosione localizzata;
- pitting;
- blisters;
- difetti di laminazione;
- cricche circonferenziali e longitudinali;
- perforazione dell'intero spessore.

Tra i limiti, si devono tuttavia attentamente considerare e valutare:

- la compatibilità chimica del fluido di processo con il film adesivo e la resina epossidica;
- la suscettibilità alla temperatura in funzione del tipo di resina e di fibra adottata. Questo vale sia per la temperatura di parete data dal fluido, sia per un utilizzo in ambiente a rischio di incendio per il quale si possono adottare una o più delle seguenti cautele:

- applicazione di materiale di riparazione addizionale quali compositi sufficientemente basici che conservano le loro proprietà durante un incendio;
- applicazione di vernici esterne intumescenti;
- applicazione di materiali intumescenti o altri assorbenti di energia entro il laminato;
- uso di resine aventi formulazione con specifica proprietà ritardante al fuoco.

3. PROCEDURE TECNICHE PER L'UTILIZZO DELLA METODOLOGIA DI RIPARAZIONE MEDIANTE MATERIALI COMPOSITI.

Con l'emissione della circolare ISPESL DCC/DTS n. A00-07/821/10 dell'8 marzo 2010, avente per oggetto la ***"Procedura ISPESL per la riparazione temporanea di attrezzature a pressione già in esercizio alla data del 12/2/2005 e comunque commercializzate fino al 29/5/02 e/o certificate in conformità alla Direttiva 97/23 CE PED.",*** l'applicazione delle metodologie sopra descritte trova un valido strumento operativo. Questo documento è il primo, nel panorama normativo italiano concernente le attrezzature a pressione, a proceduralizzare gli interventi di riparazione temporanea. Esso trova un riscontro giuridico nel comma 2 dell'art. 12 del D.M. 329/04 dove il legislatore ha previsto che:

"...omissis .....

2. *Ove nella rilevazione visiva e strumentale o solamente strumentale si riscontrano difetti che possono in qualche modo pregiudicare l'ulteriore esercibilità dell'attrezzatura, vengono*

intraprese, per l'eventuale autorizzazione da parte del soggetto preposto, le opportune indagini supplementari atte a stabilire non solo l'entità del difetto ma anche la sua possibile origine. ***Ciò al fine di intraprendere le azioni più opportune di ripristino della integrità strutturale del componente, oppure a valutarne il grado di sicurezza commisurato al tempo di ulteriore esercibilità con la permanenza dei difetti riscontrati****... omissis .....".*

La principale motivazione e la ragione di questa proceduta ISPESL è stata la necessità di regolamentare e uniformare procedure ormai consolidate nell'industria di processo, là dove queste hanno riguardato per oltre quarant'anni attrezzature non soggette ai controlli di legge.

La filosofia portante della procedura è quella di incanalare le esperienze già maturate e le tecnologie "robuste" (applicate dagli utilizzatori e/o da riparatori qualificati) in un impianto regolamentare che, definendo le responsabilità e le condizioni minime di applicabilità, prescrive un'attenta valutazione del difetto, della procedura di riparazione che s'intende applicare e l'esecuzione dell'analisi dei rischi sia a livello di applicazione/esecuzione della riparazione temporanea e sia a livello di esercizio temporaneo dell'attrezzatura con la riparazione in essere.

Tra le metodologie adottabili rientrano anche quelle relative alla riparazione temporanea con rinforzo mediante materiali compositi fin qui descritte; tali metodologie verranno approvate dal Consiglio Tecnico DCC/DTS in quanto prevedono generalmente l'applicazione di procedure standard e l'uso di materiali e tecniche coperte da brevetto o licenza.

4. CONCLUSIONI.

Per quanto sopra esposto, la tecnica del rinforzo mediante materiali compositi, considerata innovativa rispetto al D.M. 329/04 e alle leggi previgenti nell'ambito della riparazione di attrezzature a pressione, può essere considerata una valida alternativa, entro specifiche condizioni al contorno, ai metodi riconosciuti ed regolamentati da leggi, specifiche tecniche e circolari applicative, anche alla luce della nuova procedura ISPESL sulle riparazioni temporanee di attrezzature a pressione.

5. RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento per il contributo offerto alle ditte Blue Shark ed EDIS, all'Istituto Italiano della Saldatura, al Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale ed alla Facoltà di Ingegneria di Cagliari.

6. BIBLIOGRAFIA

1. T.W. Chou, R.L. McCullough, R. Byron Pipes, I materiali compositi, Le Scienze, n. 220, Dic. 1986
2. CTAIP – ISPESL DCC/DTS, Procedura ISPESL per la riparazione temporanea di attrezzature a pressione già in esercizio alla data del 12/2/2005 e comunque commercializzate fino al 29/5/02 e/o certificate in conformità alla Direttiva 97/23 CE PED, Lett. Circ. n.A00-07/821/10, dell' 8/03/10.
3. CNR-DT 200/2004 – Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.
4. CNR-DT 202/2005 – Istruzioni per interventi di consolidamento statico di strutture metalliche mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.
5. ISO/TS 24817 – Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Composite repairs for pipeworks – Qualification and design, installation, testing and inspection.

Riparazione di tubazioni ai sensi dell'art. 14 del D.M. 329/04

F. Giacobbe - A. Polimeni**
M. A. Russo - L. Romani**
*A. Scaglione** - S. Guarnaccia** - A. Gitto***

** ISPESL Dipartimento di Messina*
*** Raffineria di Milazzo*

1. SOMMARIO

Con l'entrata in vigore del D.M. 329/04 ed in particolare ai sensi dei requisiti di cui all'art. 14 gli interventi di riparazione sulle tubazioni devono essere gestite al pari dei recipienti.

Nell'ambito delle fermate di turnaround di una raffineria di petrolio diventa dunque significativa la mole di attrezzature che sono oggetto di interventi classificabili come "riparazioni".

Nella presente memoria viene illustrata l'esperienza maturata in occasione della fermata 2009 di 9 impianti della Raffineria di Milazzo (RAM). In 45 giorni sono stati effettuati interventi di riparazione per n° 92 tubazioni e n° 143 recipienti.

Le procedure operative adottate sulle tubazioni sono state impostate e pianificate preventivamente attraverso la concertazione tra i diversi soggetti coinvolti utilizzando come riferimento la circolare ISPESL n° AOO-07/0002592/09 del 08/07/09. In particolare RAM ha curato e definito il "design" documentando le specifiche tecniche dei singoli interventi su due fascicoli separati. Le specifiche tecniche "tipo" (es. qualifiche procedimenti saldatura, qualifiche saldatori, tipologia ed estensione dei controlli in prefabbricazione e montaggio, ecc) che tengono conto anche del know how della ditta che effettuerà le lavorazioni e le specifiche tecniche di "dettaglio" che puntualizzano le caratteristiche di ogni singolo intervento (es. disegno schematico, stress analysis, esecuzione o esenzione della prova idraulica, ecc). ISPESL ha seguito l'esame documentale, le attività ispettive in campo e la verbalizzazione finale per la ripresa in servizio delle attrezzature. Le diverse pratiche di riparazione sono state suddivise in funzione dell'impianto e della ditta incaricata di eseguire i lavori. Tutti i dati utili all'identificazione della linea ed alla caratterizzazione della riparazione sono stati organizzati sotto forma di tabelle.

A conclusione delle attività, al fine di agevolare e velocizzare la verbalizzazione finale, è stato predisposto un modulo flessibile che tiene conto delle diverse possibili varianti.

2. INTERVENTO DI RIPARAZIONE SU UNA TUBAZIONE

Per "riparazione" si intende la sostituzione o ripristino di parti di una tubazione, con o senza saldatura, senza cambiare le caratteristiche originali del progetto[1]. In caso contrario si rientra nella problematica della "modifica" e l'intervento viene gestito in conformità alla Direttiva PED.

A titolo esemplicativo, e di guida, sono elencati alcuni casi tipici di interventi di riparazione su tubazioni:

- Inserimento (o eliminazione) di un accoppiamento flangiato
- Inserimento di un pezzo a T, innesto diretto o outlet per connessioni con altre tubazioni
- Inserimento di una valvola
- Inserimento di un filtro



Figura 1 – Esempi di interventi di riparazione su tubazioni.

- Sostituzione di un tratto di tubazione
- Cambio del fluido contenuto senza aumento di categoria di rischio, con un fluido diverso da quello previsto nella documentazione a corredo dell'attrezzatura ma compatibile con il progetto.
- Variazione del diametro nominale senza aumento della categoria di rischio.
- Variazione parziale di lay-out di una tubazione senza modificare il contenuto della tubazione, lo scopo principale e il sistema di sicurezza

Ai sensi della circolare ISPESL A00-07/0002592/09 e dell'art. 15 del D.M. 329/04 gli interventi di riparazione per cui è richiesto la comunicazione all'ISPESL, sono i seguenti casi:

Gruppo del fluido	Stato del fluido	Categoria dell'attrezzatura		
		I	II	III
1	liquido	NO	SI	SI
	gas, vapori e liquidi surriscaldati	SI	SI	SI
2	liquido	NO	NO	NO
	gas, vapori e liquidi surriscaldati	NO	NO	SI

Tabella 1 – Coinvolgimento dell'ISPESL nell'ambito delle riparazioni su tubazioni

L'iter documentale con ISPESL prevede temporalmente tre distinte fasi (vedi figura 2).

La prima, a carattere propedeutico, prevede l'inoltro della documentazione comprovante le competenze tecniche (con particolare riferimento all'esecuzione e controllo dei giunti saldati) della ditta che materialmente effettuerà i lavori di riparazione. Fanno parte integrante di tale fascicolo le:

- Qualifiche delle Procedure di saldatura (WPAR)
- Procedimenti di saldatura (WPS)
- Elenco e certificati dei saldatori
- Elenco e certificati del personale addetto ai CND
- Piano di controllo e qualità (PCQ)

La seconda fase definisce in dettaglio l'intervento manutentivo fornendo tutte le specifiche informazioni e determinazioni tecniche. La documentazione allegata alla comunicazione deve contenere le seguenti informazioni:

- Identificazione della tubazione;
- Tipologia e descrizione della riparazione (evidenziando le motivazioni che caratterizzano l'intervento come "riparazione" e non come "modifica");
- Indicazione del numero di giunzioni saldate;
- Disegno schematico (es. Sketch assonometrico);
- Valore della pressione della prova finale (se non è possibile eseguirla viene riportata la motivazione). Nel caso di prova pneumatica vengono riportate le considerazioni operative di sicurezza;

• Considerazioni circa la necessità di esecuzione di un calcolo di stress analysis per verificare eventuali nuove condizioni critiche.

Il funzionario ISPESL in process (es. in prefabbricazione) e a conclusione dei lavori effettua una ispezione al fine di verificare la rispondenza dei lavori eseguiti al progetto approvato. Tale attività è prevista sia per la II e che III categoria. Per ciò che riguarda la prova finale (test idraulico o pneumatico) è necessario distinguere diversi casi: innanzi tutto se si tratta di una tubazione classificata in II categoria è il riparatore che predispone, effettua e certifica l'esito positivo della prova; nel caso di III categoria la certificazione viene emessa dal funzionario ISPESL direttamente nella verbalizzazione. Il Riparatore può avvalersi, ai sensi della circolare ISPESL Prot. A00-07/0002592/09 della possibilità di eseguire parzialmente (solo per i tratti di tubazione prefabbricati) o di non eseguire totalmente la prova finale. In tal caso, in sostituzione della suddetta prova, vengono eseguiti controlli non distruttivi di tipo volumetrico al 100%.

Ad intervento concluso si attiva la terza ed ultima fase che comprende la documentazione attestante le operazioni svolte dal Riparatore (vedi paragrafo 2.1) e la verbalizzazione da parte dell'ISPESL (vedi paragrafo 2.2)

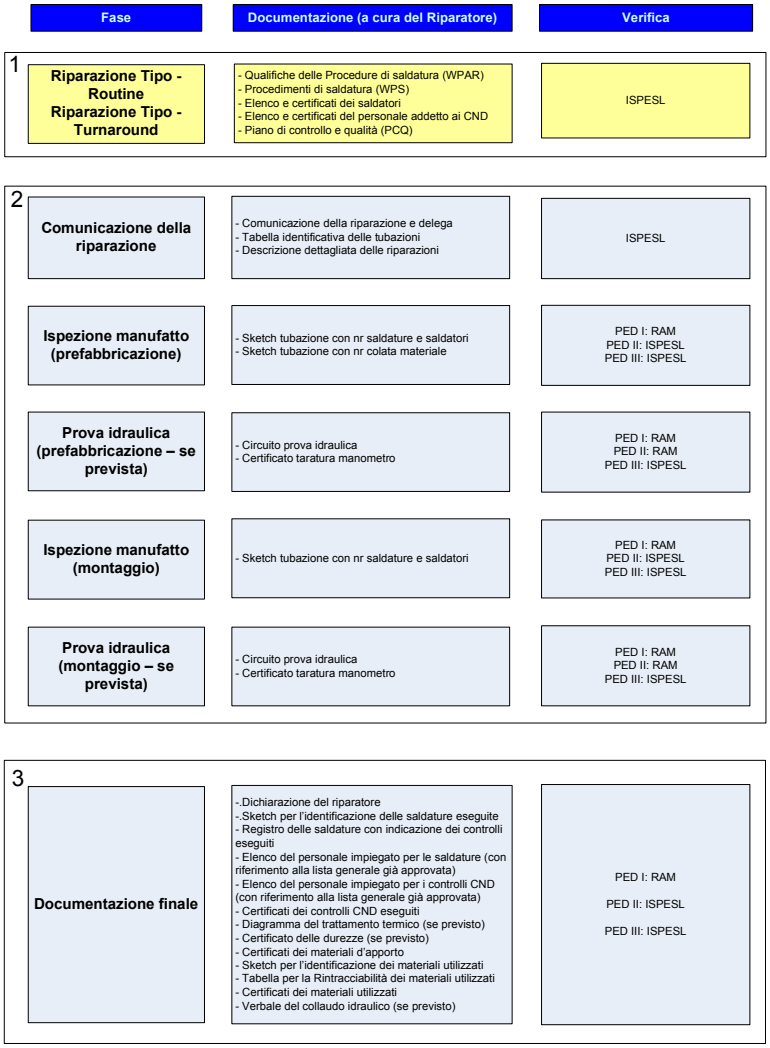


Figura 2 – Schematizzazione delle diverse fasi di sviluppo di un intervento di riparazione su tubazioni

2.1. Documentazione finale

Al termine dell'esecuzione della riparazione, deve essere preparata da parte del Riparatore la seguente documentazione:

- Dichiarazione del riparatore
- Sketch per l'identificazione delle saldature eseguite
- Registro delle saldature con indicazione dei controlli eseguiti
- Elenco del personale impiegato per le saldature (con riferimento alla lista generale già approvata)
- Elenco del personale impiegato per i controlli CND (con riferimento alla lista generale già approvata)
- Certificati dei controlli CND eseguiti
- Diagramma del trattamento termico (se previsto)
- Certificato delle durezze (se previsto)
- Certificati dei materiali d'apporto
- Sketch per l'identificazione dei materiali utilizzati
- Tabella per la Rintracciabilità dei materiali utilizzati
- Certificati dei materiali utilizzati
- Verbale del collaudo idraulico (se previsto)

Eventuali procedure (WPS, WPAR, ecc.) o certificati (saldatori o operatori CND) utilizzati per l'intervento di riparazione e non presenti nella Documentazione Tipo (fase 1) dovranno essere allegati alla documentazione finale.

Per la preparazione della documentazione, il Riparatore dovrà attenersi alle indicazioni riportate "Procedura per le pratiche di riparazione delle tubazioni ai sensi dell'art. 14 del D.M. 329/04" emessa da RAM.

2.2. Verbalizzazione

Le attività collegate ad un intervento di riparazione su tubazioni si conclude con la verbalizzazione da parte del funzionario ISPESL. Per agevolare le attività è stato predisposto un modello "flessibile" (si adatta alle diverse possibili combinazioni che si possono determinare attraverso l'apposizione di un visto di applicazione). Il verbale è unico sia per le tubazioni di II categoria che per le III categorie. Viene fatto anche riferimento agli adempimenti connessi all'art. 16 del D.M. 329/04.

Il verbale prevede dei campi ognuno dei quali viene compilato in funzione delle relative informazioni abbinate alla specifica tubazione. Indichiamo di seguito, in forma sintetica, i singoli riquadri :

- campo data: è relativo alla giornata in cui si esegue l'attività parziale o finale;
- riferimenti: indicazione della lettera di comunicazione dell'Utente e del protocollo ISPESL;
- cronologico: numero addebito riferito alla riparazione (codice L);
- Utente - Riparatore - Ditta esecutrice: indicazione delle singole ragioni sociali;
- Identificazione tubazione: indicazione Item o altro identificativo;
- Caratteristiche: valori significativi di caratterizzazione della tubazione;
- Verbale: testo riguardante la verbalizzazione.

È previsto un campo generico "note" che permette di integrare e personalizzare la singola verbalizzazione.

Tale verbale strutturato in modo schematico permette di registrare opportunamente le attività di riparazione e di standardizzare la verbalizzazione con conseguente velocizzazione dell'attività.

In figura 3 un esempio di verbalizzazione emessa in occasione di una riparazione di una tubazione di III categoria.

ISPESL

ISTITUTO SUPERIORE PER LA PREVENZIONE E LA SICUREZZA DEL LAVORO

Dipartimento Territoriale di Messina

VERBALE DI RIPARAZIONE TUBAZIONI

DATA	Lettera riparatore 126/09 del 08.10.09 prot. ISPESL 4662 del 12.10.09		CRONOLOGICO: RR709472
UTENTE **RAM di Milazzo (ME)**	RIPARATORE **RAM**	DITTA ESECUTRICE **AAA**	
N. Matricola Ispesl o, in mancanza, N. di fabbrica, o in mancanza ITEM		**BBB_L_A102A** **BBB_L_A113A** **BBB_L_A113**	

CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA TUBAZIONE

CAMERA	Press.ammiss. MAX (bar)	Temp. ammiss. MIN (°C)	MAX	FLUIDO Natura	Stato	Gruppo	DN (-) max	Categoria PED
Corpo principale	(A102)7,45 (A113A)5,49 (A113)5,49	0	173 291 291	B.A.P. G.A.L. G.A.L.	G	1	450	III

In data odierna, presso la ditta utilizzatrice RAM (che assume la figura giuridica di riparatore) e su richiesta della stessa, in accordo con la procedura prevista dalla lettera circolare ISPESL n° AOO-07/0002592/09 del 08/07/09, si esegue la verifica finale della tubazione descritta sopra.

☐ trattasi di una tubazione fabbricata ai sensi della direttiva PED

☒ trattasi di una tubazione oggetto di denuncia ai sensi dell'art.16 del D.M. 329/04.

Si precisa che: l'utente ha provveduto ad effettuare la denuncia; il sopralluogo e la riqualificazione periodica a cura dell'ISPESL sono programmati successivamente la conclusione della fermata impianti di ottobre/novembre 2009.

La riparazione è consistita in: Vedi Allegato 1 della comunicazione di riparazione del 08.10.09 prot. RAM 126/09-prot ISPESL 4662 del 12.10.09.

Da un esame visivo, limitatamente a quanto ispezionabile e rilevabile ad occhio nudo, l'intervento risulta conforme alla procedura di riparazione proposta dall'utente e valutata positivamente con nota n° 4810 del 19.10.09 rilasciata dal Dipartimento di Messina.

☒ In precedenza è stata valutata positivamente con nota n° 4809 del 19.10.09 rilasciata dal Dipartimento di Messina la "documentazione tipo" che tiene conto dei documenti tecnici della ditta che operativamente ha effettuato il lavoro.

Relativamente alle saldature si prende atto dell'esito positivo dei CND previsti.

- **II categoria**

☐ Rientrando l'attrezzatura (II categoria) nel punto 2 del paragrafo 5 della lettera circolare suddetta non si presenzia alla prova idraulica

☐ Si prende atto dell'esito positivo della prova eseguita a cura del riparatore (vedi verbale allegato).

☐ Si prende atto che la prova idraulica non è stata eseguita rientrando l'intervento nella nota 3) della lettera circolare suddetta

- **III categoria**

☒ Rientrando l'attrezzatura (III categoria) nel punto 3 del paragrafo 5 della lettera circolare suddetta, si presenzia alla prova idraulica.

☒ Prova idraulica con acqua eseguita in opera con esito positivo alla pressione di 9,3 (Vedi Note) bar;

☒ Prova idraulica con acqua eseguita per i tratti realizzati in prefabbricazione con esito positivo alla pressione di 9,3 (Vedi Note) bar;

☐ Prova idraulica non eseguita rientrando l'intervento nella nota 3) della lettera circolare suddetta

Note: La pressione della prova è stata anche per il tratto della A113A, appartenente allo spool A, pari a 9,3 barg (e non 6,9 barg come richiesto per una riparazione) perché la tubazione è stata pressata insieme alla linea A102. Presentato calcolo di stabilità alle condizioni di pressione pari a 9,3 barg.

Visto l'esito positivo dell'esame della documentazione prodotta e delle verifiche di cui sopra, si esprime parere favorevole alla messa in servizio dell'attrezzatura (chiarimento n° 42850 del 20.07.05 del Ministero Attività Produttive).

L'utente deve esercire l'attrezzatura secondo le leggi vigenti.

ALLEGATI:

- Dichiarazione del riparatore;
- ☐ verbale di prova idraulica della ditta AAA

Il funzionario tecnico

Figura 3 – Schematizzazione delle diverse fasi di sviluppo di un intervento di riparazione su tubazioni

3. CASI PARTICOLARI

Di seguito sono riportati alcuni casi particolari di riparazione:

CASO A: Inserimento di una nuova linea PED su una esistente

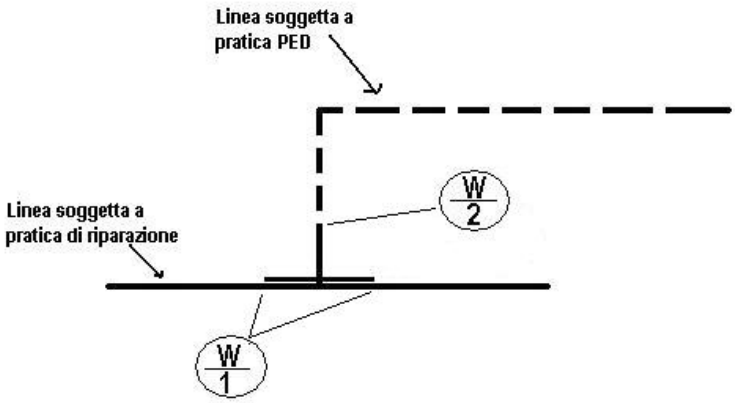


Figura 4 – Schematizzazione dell'inserimento di una nuova linea PED su una esistente

Per un corretto espletamento della pratica di riparazione sarà necessario impostare la documentazione nel seguente modo:

La descrizione dettagliata della tubazione soggetta a riparazione deve riferirsi solo alle saldature W1 e W2.

Qualora sia possibile effettuare la prova idraulica dell'insieme di tubazioni (riparata e PED) è necessario valutare i diversi valori di prova idraulica a cui sarebbero soggette.

Il registro delle saldature riporterà solo le informazioni relative alle saldature W1 e W2

La tabella di identificazione dei materiali deve includere il certificato del materiale della piastra ed il certificato del materiale del tubo, che si innesta sull'esistente (che deve essere riportato anche nella pratica PED).

CASO B: Ripristino della connessione tra più tubazioni

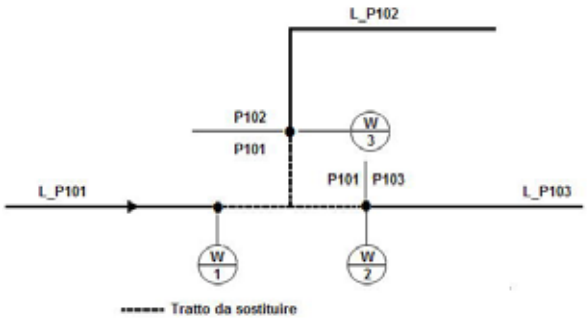


Figura 5 – Schematizzazione Ripristino della connessione tra più tubazioni

Per un corretto espletamento della pratica di riparazione sarà necessario impostare la documentazione nel seguente modo:

Deve essere preparata una sola descrizione dettagliata di riparazione e deve riferirsi alle 3 tubazioni (P101, P102 e P103).

La tabella identificativa delle tubazioni deve essere compilata nel seguente modo:

Ditta	Impianto	Item	Ulteriori dati	Prova idraulica SI/NO	Pressione Prova idraulica [bar]	Nr giunti soggetti a riparazione	Comunicazione ad ISPESL (Nr protocollo)	Descrizione Intervento (Nr Allegato della Comunicazione)
Ditta AAA	BBB	BBB_L_P101	...	SI	12,6	WW	PROT XXXX/YY	Allegato 1
Ditta AAA	BBB	B B B _ L _ P102	...					
Ditta AAA	BBB	B B B _ L _ P103	...					

Il registro delle saldature riporterà le informazioni relative alle saldature W1, W2 e W3 e sarà riferito alle tre tubazioni.

4. BIBLIOGRAFIA

1 Circolare ISPESL Prot. A00-07/0002592/09, 2009

2 Specifica CTI 03050B012 “Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte x: Riparazioni e modifiche” Rev 7 del 15.04.09

3 Raffineria di Milazzo, “Procedura per le pratiche di riparazione delle tubazioni ai sensi dell’art. 14 del D.M. 329/04”, 2010

NOTE

(1) Esempi di riparazione citati nella specifica CTI 03 05 0B 012 al paragrafo 5 prospetto 1: 3) Sostituzione di una “parte” di una attrezzatura, quali ad esempio flange, bocchelli, stacchi, fondi, fondelli, ed altro, con “parti” di geometria identica e materiale uguale o con un materiale dello stesso gruppo di saldatura di quello del progetto originario, che abbia comunque caratteristiche meccaniche non inferiori; 6) Inserimento di un accoppiamento flangiato o di un pezzo a T in una tubazione o variazione del tipo di collegamento (ad esempio saldato, flangiato), in un recipiente a pressione, che, ad una verifica di progetto, sia compatibile con il progetto originario; 14) Variazione di lay-out di una tubazione senza modificare il contenuto della tubazione, lo scopo principale e il sistema di sicurezza

sessione TEMATICA
INTEGRITÀ STRUTTURALE DI MATERIALI E COMPONENTI

Approccio valutativo strutturato per la verifica d'integrità di attrezzature a pressione ai fini della riqualificazione periodica.

G. Augugliaro - F. Brini**
C. De Petris - C. Mennuti**
*G. Inguì***

**ISPESL – Laboratorio Controlli Non Distruttivi, Dipartimento Tecnologie di Sicurezza*
***Libero professionista*

1. SOMMARIO

Le verifiche d'integrità delle attrezzature a pressione, così come sinteticamente indicate nell'accezione degli addetti, vengono tradizionalmente svolte, a meno di casi singolari per modalità costruttive o per eccezionali condizioni di esercizio, combinando le risultanze di un esame visivo condotto esternamente e, ove possibile, internamente alla membratura, integrato da misure spessimetriche.

Tali controlli non distruttivi, finalizzati essenzialmente al rilevamento di discontinuità superficiali della membratura prodotte dall'azione combinata di sollecitazioni meccaniche, termiche ed all'azione corrosiva generata dal fluido contenuto e dall'ambiente circostante, per altro esplicitamente prescritti all'art. 12 del D.M. n. 329/2004, vengono considerati cogenti e propedeutici ad ogni altro tipo di accertamento diagnostico ai fini della verifica di integrità.

Per quanto elementari i controlli con esame visivo e spessimetrici combinano caratteristiche di efficacia, rapidità ed economicità. Diversamente, sarebbe incauto immaginare per loro una semplicità applicativa che è spesso sinonimo di marginalità ispettiva a tutto detrimento della invocata sicurezza.

Per altro, tali controlli, sia pur normati a livello internazionale come approcci metodologici non sono supportati da una strutturazione della pratica applicativa e, soprattutto, da procedure di oggettiva valutazione dello stato di conservazione e di efficienza, come richiesto dall'attuale legislazione.

Per tale ragione, l'ISPESL ha ritenuto doveroso, anche in considerazione dell'evoluzione tecnologica della strumentazione dedicata, proporre un approccio strutturato della verifica periodica basata su tali controlli fornendo anche specifiche raccomandazioni operative, applicative ed interpretative dei riscontri e delle misure effettuati.

2. PREMESSA

La verifica d'integrità della membratura di un'attrezzatura a pressione è sicuramente materia nota agli addetti delle Prove Non Distruttive e sembrerebbe quasi pleonastico trattarne ulteriormente la problematica sotto il profilo tecnico ed operativo.

Come noto, il comma 1 dell'art. 12 del D.M. 1 dicembre 2004 n. 329 indica nella combinazione dell'esame visivo eseguito dall'esterno e dall'interno e dei controlli spessimetrici, eventualmente integrati con altri controlli che si rendano necessari a fronte di situazioni evidenti di danno, le modalità d'ispezione delle membrature ai fini della valutazione dello stato di conservazione e di efficienza dell'attrezzatura.

A fronte delle prescrizioni disposte dal decreto, è comunque da rilevare che non sembra tro-

varsi un documento tecnico di riferimento che fornisca quelle indicazioni che consentano agli esperti incaricati, sia pur qualificati all'applicazione dei metodi di controllo non distruttivo, di seguire un percorso di verifica strutturato, cioè con caratteristiche di congruenza all'approccio ispettivo tale da rendere per quanto possibile oggettiva la successiva fase interpretativa dei risultati conseguiti.

Non vi è dubbio che la verifica d'integrità, come intesa dal legislatore, assuma una connotazione inequivocabile di accertamento della stabilità dell'attrezzatura a fronte di un periodo di esercizio (il cui limite massimo è comunque determinato nelle tabelle allegate allo stesso decreto). A meno di diverse e più specifiche prescrizioni e indicazioni fornite dal Fabbricante o dal Piano dei Controlli, il meccanismo di danno dominante su materiali a matrice metallica è quello della corrosione in tutte le sue forme e, per alcuni casi, della erosione.

Di conseguenza gli effetti del fenomeno sono noti, così come consolidate sono le metodiche di rilevabilità delle discontinuità prodotte. Per tale ragione è pienamente condivisibile, per attrezzature che consentono una completa e diretta accessibilità alle membrature, utilizzare la combinazione dell'esame visivo, che sotto il profilo qualitativo fornisce un'immediata percezione dell'estensione e della gravità del degrado, con il controllo spessimetrico, che ne è il complemento sotto quello quantitativo.

A questa considerazione si aggiunga, fattore non trascurabile, che l'ispezione così congeniata, non implicando un impegno di sofisticate risorse strumentali, rende quindi la verifica, oltre che rapida ed agevole, discretamente accessibile in termini economici.

Al contempo non deve essere equivocata la semplicità di un tal approccio alla verifica come inconsistenza della sua efficacia, validità ed affidabilità.

Ciò premesso, la presente memoria costituisce un tentativo di definire un percorso strutturato dell'ispezione secondo criteri di esecuzione dei controlli e di analisi interpretativa dei risultati che rendano al meglio oggettive le modalità di valutazione dello stato di conservazione e di efficienza delle attrezzature indagate.

In questa logica, quindi, la presente monografia acquisisce le caratteristiche di un documento utile alla elaborazione di una procedura, limitando, per ovvi motivi, alle metodiche di base dell'esame visivo e del controllo spessimetrico delle membrature, l'approccio ispettivo così come regolamentato dal comma 1 dell'art.12 del D.M. 1 dicembre 2004 n. 329.

Si evidenzia che sono escluse dalla presente trattazione le attrezzature a pressione soggette a fenomeni di scorrimento viscoso.

Per questioni non espressamente definite, si rimanda alle specifiche norme nazionali ed internazionali del metodo di Prova Non Distruttiva di riferimento.

3. DESCRIZIONE DELL'APPROCCIO AI FINI DELLA VALUTAZIONE DELLO STATO DI CONSERVAZIONE E DI EFFICIENZA DELL'ATTREZZATURA A PRESSIONE.

L'approccio di seguito illustrato propone un modello per l'esecuzione della verifica d'integrità di attrezzature a pressione ai fini del loro esercizio in sicurezza per un determinato periodo di tempo.

In particolare, si ha lo scopo di fornire sintetiche indicazioni circa la esecuzione, valutazione dei risultati, registrazione e archiviazione della documentazione dei controlli da eseguire sulle attrezzature a pressione ai fini della valutazione del loro stato di conservazione e di efficienza.

In generale, l'approccio che qui si presenta è riferibile ad attrezzature a pressione già preventivamente identificate e classificate secondo le disposizioni di cui all'art. 9 del D.Lgs. n. 93/2000, (Direttiva 97/23/CE o direttiva PED) al fine di individuare le periodicità di esecuzione delle verifiche di riqualificazione indicate negli allegati A e B al D.M. n. 329/2004. Fermi restando tali limiti temporali o quelli suggeriti dal Fabbricante, i termini di esecuzione delle verifiche vanno stabiliti tenendo conto delle risultanze delle ultime verifiche effettuate.

3.1. Documentazione preliminare alle verifiche

Preliminarmente alle verifiche, al personale addetto alla verifica d'integrità deve essere resa disponibile la seguente documentazione:

- libretto matricolare o dichiarazione CE di conformità dell'attrezzatura a pressione;
- disegni e/o schemi dai quali sia possibile ricavare le principali caratteristiche e gli spessori dei materiali, nonché le caratteristiche geometriche e funzionali dell'attrezzatura a pressione;
- verbalizzazioni di precedenti verifiche;
- scheda delle misure di sicurezza da attuare per l'esecuzione delle verifiche.

3.2. Descrizione delle fasi della verifica di integrità (vedi l'incipit del diagramma di flusso)

Il flusso logico delle fasi necessarie a svolgere la verifica d'integrità viene illustrato in fig. 1. La loro articolazione può essere così sinteticamente definita:

1. analisi storica di funzionamento dell'attrezzatura anche attraverso la lettura del libretto delle verifiche;
2. verifica dell'accessibilità completa dell'attrezzatura a pressione dall'esterno e dall'interno;
3. prova di pressione con liquido o, in caso di necessità e previa predisposizione da parte dell'utente di opportuni provvedimenti di cautela previsti dalla legislazione vigente, con gas delle camere dell'attrezzatura a pressione non ispezionabili;
4. esame visivo delle membrature e relativa valutazione del Parametro Indicativo della Difettosità *(PID_{EV}) (§ A.1);*
5. acquisizione dello spessore minimo ammissibile s_0 dalla documentazione (per esempio: dai disegni/schemi di fabbricazione o libretto ISPESL dell'attrezzatura a pressione);
6. individuazione del meccanismo di danno di corrosione come noto o prevedibile. In tal caso, valutazione della velocità di corrosione v_{rc} (*§ A.4*);
7. calcolo dello spessore minimo ammissibile di efficienza $s_{0,eff}$ (*§ A.5*);
8. controllo spessimetrico e relativa valutazione dello spessore minimo misurato s_{min} o minimo convenzionale s_c (*§ A.2.1*);
9. verifica dello spessore minimo misurato s_{min} o minimo convenzionale s_c rispetto allo spessore minimo ammissibile s_0 o minimo ammissibile di efficienza $s_{0,eff}$ (*§ A.3*);
10. accertamento dell'idoneità all'impiego in sicurezza dell'attrezzatura a pressione per l'intervallo di tempo massimo previsto dalla legislazione vigente;
11. eventuale declassamento dell'attrezzatura a pressione (*§ A.6*);
12. eventuale determinazione di un nuovo intervallo di tempo inferiore rispetto a quello previsto dalla normativa vigente per la successiva riqualificazione periodica (*§ A.7*);
13. eventuale esecuzione di ulteriori CND integrativi;
14. eventuale arresto e riparazione, oppure dismissione.

Quando l'attrezzatura ha caratteristiche tali da non consentire adeguate condizioni di accessibilità all'interno o risulta comunque non ispezionabile esaustivamente, l'ispezione e' integrata, limitatamente alle camere non ispezionabili, con una prova di pressione a 1.125 volte la pressione PS che può essere effettuata utilizzando un fluido allo stato liquido:

$$P_{t,liq} = 1.125 \cdot PS \qquad (1)$$

La prova di pressione idraulica può essere sostituita, in caso di necessità e previa predisposizione da parte dell'utente di opportuni provvedimenti di cautela, previsti dalla legislazione vigente, con una prova di pressione con gas (aria o gas inerte) ad un valore di 1,1 volte la pressione PS:

$$P_{t,gas} = 1.1 \cdot PS \qquad (2)$$

In tale caso dovranno essere prese tutte le misure di sicurezza previste per tale tipo di collaudo e la prova deve avere una durata minima di due ore durante le quali deve essere verificata l'assenza della caduta di pressione.

3.3. Valutazione dello stato di conservazione

La valutazione dello stato di conservazione è il giudizio sulle condizioni fisiche strutturali in cui l'attrezzatura a pressione si trova rispetto alla sua stabilità strutturale a PS e TS_{max} / TS_{min}.

La valutazione dello stato di conservazione si compone delle seguenti fasi:

a.1) esame visivo delle membrature e relativa valutazione del Parametro Indicativo della Difettosità (PID_{EV})) (§ A.1);

a.2) conoscenza dello spessore minimo ammissibile s_0 reperibile dalla documentazione in dotazione all'attrezzatura a pressione (per esempio: dai disegni/schemi di fabbricazione o libretto ISPESL dell'attrezzatura a pressione), ovvero sua valutazione;

a.3) controllo spessimetrico e relativa valutazione dello spessore minimo misurato s_{min} o minimo convenzionale s_c (*§ A.2*);

a.4) eventuale prova di pressione con liquido o gas delle camere dell'attrezzatura a pressione non ispezionabili.

3.4. Valutazione dello stato di efficienza

La valutazione dello stato di efficienza è il giudizio, basato sulla valutazione dello stato di conservazione e in relazione all'azione evolutiva dei meccanismi di danno noti e prevedibili in funzione del tempo, sull'idoneità o meno all'esercizio in sicurezza dell'attrezzatura a pressione fino alla successiva verifica d'integrità.

La valutazione dello stato di efficienza si compone delle seguenti fasi:

b.1) individuazione del meccanismo di danno di corrosione come noto o prevedibile. Questa fase è finalizzata al riconoscimento del degrado strutturale dell'attrezzatura a pressione per effetto della presenza dell'azione corrosiva/erosiva (§ A.3) del fluido contenuto e/o dell'azione corrosiva/erosiva dovuta a fattori esterni (agenti ambientali, coibentazione, supporti, staffaggi, ecc.).

b.2) calcolo dello spessore minimo ammissibile di efficienza s_0,eff (§ A.5);

b.3) verifica dello spessore minimo misurato S_{min} o dello spessore minimo convenzionale sc rispetto a quello minimo ammissibile di efficienza s_o,eff (§ A.3);

b.4) accertamento dell'idoneità all'impiego in sicurezza dell'attrezzatura a pressione per l'intervallo di tempo massimo previsto dalla normativa vigente;

b.5) eventuale declassamento dell'attrezzatura a pressione (§ A.6);

b.6) eventuale determinazione di un nuovo intervallo di tempo inferiore rispetto a quello previsto dalla normativa vigente per la successiva verifica d'integrità (§ A.7).

4. PERSONALE

Il personale addetto all'esecuzione delle verifiche dovrebbe:

- essere dotato di una idonea capacità visiva (rif. EN 473);
- qualificato allo scopo;
- a conoscenza delle relative disposizioni di legge, norme, standard di prodotto, regole tecniche, codici o specifiche tecniche applicabili;
- a conoscenza delle procedure di fabbricazione utilizzate, nonché della funzione e delle condizioni operative dell'attrezzatura a pressione;
- in grado di utilizzare le apparecchiature strumentali e di ausilio alle verifiche.

5. DOTAZIONE STRUMENTALE E AUSILIARIA

Il personale addetto all'esecuzione delle verifiche dovrebbe, all'occorrenza, disporre di una dotazione strumentale e ausiliaria, utile al rilevamento di grandezze caratteristiche dell'attrezzatura a pressione nonché al rilievo di discontinuità, all'eventuale loro misurazione di parametri caratteristici o degli effetti del degrado (riduzione dello spessore, estensione della superficie corrosa, ecc.).

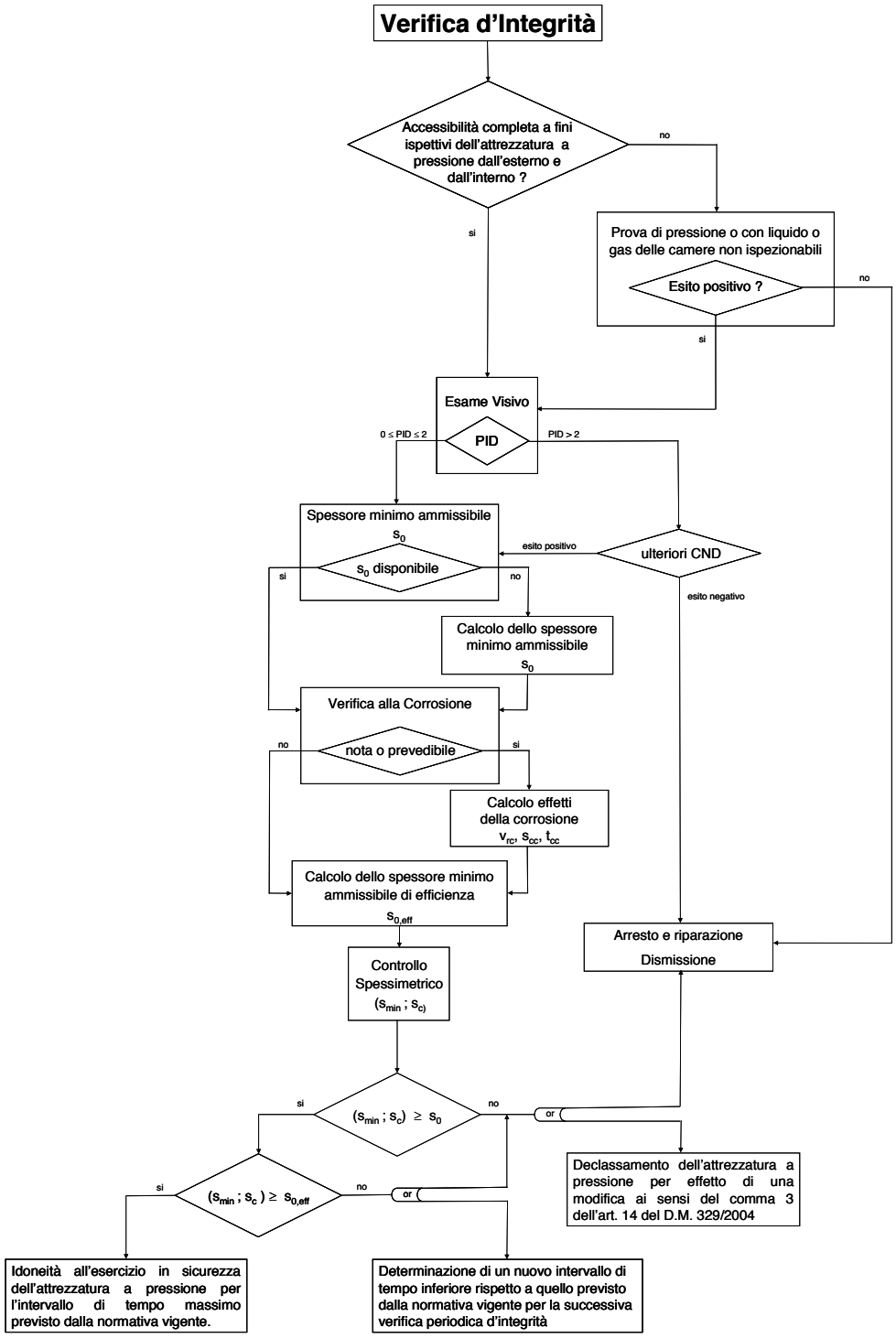


Fig. 1- Schema logico della verifica d'integrità per attrezzatura a pressione soggetta a corrosione/erosione.

6. LIBRETTO DELLE VERIFICHE

E' raccomandato comporre un libretto delle verifiche come documento a corredo dell'attrezzatura a pressione che raccolga la seguente documentazione:

- dichiarazione di messa in servizio e (se prevista) della verifica di messa in servizio;
- verbali delle verifiche di funzionamento,
- verbali delle verifiche d'integrità.

I rapporti di prova dell'esame visivo e del controllo spessimetrico costituiscono allegati al libretto delle verifiche dell'attrezzatura a pressione.

A conclusione della verifica d'integrità deve essere sempre redatto, a cura del personale incaricato, uno specifico verbale che espliciti l'idoneità o la non idoneità dell'attrezzatura a pressione ad essere ulteriormente esercita.

7. ARCHIVIAZIONE DELLA DOCUMENTAZIONE

Tutta la documentazione acquisita, sia precedentemente sia successivamente ai controlli e alle verifiche, deve essere conservata e archiviata secondo modalità conformi alle disposizioni della vigente legislazione e/o normativa applicabile, ovvero ad una specifica procedura.

A.1 Modalità di esecuzione dell'Esame Visivo

L'esame visivo può essere condotto sia sulle superfici esterne sia sulle superfici interne, su componenti o su elementi delle attrezzature a pressione, compatibilmente con gli oggettivi impedimenti di accessibilità.

Le modalità di esecuzione dell'Esame Visivo su attrezzature a pressione vengono ampiamente descritte nella Linea Guida dell'ISPESL [1].

Qualsiasi indicazione rilevata sulla superficie esaminata e riconducibile a discontinuità deve essere identificata per tipologia (interpretazione) e valutata (classificazione) in relazione alla sua severità (livello di rischio connesso) e/o agli specifici criteri di accettabilità o di valutazione.

In Tab. 1 è riportato un estratto dell'elenco delle più tipiche discontinuità rilevabili su attrezzature a pressione e su loro componenti mediante esame visivo, la corrispondente definizione, un codice sintetico utile alla compilazione del Rapporto di Prova, e il coefficiente d'intensità necessario al calcolo del peso della singola discontinuità, il cui significato viene di seguito meglio illustrato.

Al fine di caratterizzare la discontinuità rilevata con esame visivo, viene definito un approccio semi-quantitativo di valutazione della discontinuità stessa, da applicare successivamente alla sua interpretazione.

È comunque d'obbligo premettere che tale criterio di valutazione, pur essendo semplice nella sua enunciazione, risulta, per contro, di difficile attuazione, basandosi quasi esclusivamente sull'esperienza soggettiva.

L'algoritmo proposto consente una rapida valutazione della *i-esima* discontinuità rilevata sulla superficie esaminata, semmai anche in relazione agli specifici criteri di accettabilità, attraverso un peso della discontinuità G_i calcolato come segue:

$$G_i = (C_{1i} * C_{2i}) \qquad (1)$$

dove C_{1i} è il coefficiente di estensione, dato dal rapporto fra la superficie affetta dal meccanismo di danno considerato e la superficie complessiva del componente interessato (fasciame, fondo, bocchello, ecc.) e C_{2i} è il coefficiente di intensità, da intendersi come un indice di severità della discontinuità ai fini dell'esercizio in sicurezza dell'attrezzatura a pressione, componente o elemento, anche in relazione alla sua possibile evoluzione nel tempo. Si precisa che nel calcolo del coefficiente di estensione C_{1i}, occorre considerare non tanto le superfici delle singole discontinuità quanto l'area del poligono che racchiude la superficie interessata dal fenomeno di danneggiamento considerato e rapportarla alla superficie complessiva del componente interes-

sato (fasciame, fondo, bocchello, ecc.); per discontinuità non valutabili in termini di superficie (es.: cricche) il coefficiente di estensione viene comunque posto pari a 1.

A conclusione dell'esame visivo, è possibile esprimere una valutazione complessiva delle discontinuità rilevate e del relativo giudizio, attraverso il calcolo di un ulteriore Parametro Indicativo della Difettosità (PID_{EV}), specifico per una stessa attrezzatura a pressione. Tale valutazione finale viene semplicemente rappresentata come somma dei contributi peso delle singole discontinuità, assumendo quindi la forma:

$$PID_{EV} = \sum(G_i) \qquad (2)$$

A valle del calcolo del *Parametro Indicativo della Difettosità* (PID_{EV}), occorre corrispondentemente effettuare una prima classificazione dell'attrezzatura a pressione per orientare il percorso delle successive azioni.

In tal senso, tale criterio di classificazione dell'attrezzatura a pressione è articolato su più livelli di severità secondo lo schema di seguito riportato:

Non sono rilevate discontinuità

- $PID_{EV} = 0$ — L'esame visivo non evidenzia discontinuità.

Discontinuità che non richiedono interventi nell'immediato

- $0 < PID_{EV} \leq 1$ — L'attrezzatura a pressione presenta discontinuità dalle caratteristiche tali da non evolvere, presumibilmente, verso condizioni di rischio significativo fino alla successiva verifica programmata. E' comunque obbligatoria la registrazione delle discontinuità rilevate.

Discontinuità che richiedono interventi nell'immediato

- $1 < PID_{EV} \leq 2$ — L'attrezzatura a pressione presenta discontinuità che possono evolvere verso condizioni di rischio non trascurabili che richiedono interventi nell'immediato. Se ritenuto necessario, oltre al successivo controllo spessimetrico, possono essere richiesti ulteriori controlli e accertamenti integrativi con altri metodi PND, così come una osservazione più sistematica dell'attrezzatura a pressione fino, per alcuni casi, al monitoraggio.

- $PID_{EV} > 2$ — L'attrezzatura a pressione presenta discontinuità di rilevanza tale da imporre l'attuazione di iniziative immediate di crescente attenzione, come:
  - esecuzione di ulteriori controlli e accertamenti integrativi con altri metodi PND,
  - arresto e/o riparazione,
  - dismissione.

Elenco delle discontinuità			*Coefficiente di intensità C_{2i}*
Codice	**Denominazione**	***Breve descrizione***	
1	Abrasione	Danneggiamento della superficie per asportazione meccanica di particelle metalliche.	**1**
3	Ammaccatura (*)	Depressione accidentale di superficie.	**2**
9	Cratere di corrosione	Tipo di corrosione localizzata che provoca cavità la cui profondità risulti del medesimo ordine di grandezza delle sue dimensioni trasversali.	**3**
10	Cricca affiorante	Discontinuità prodotta da una rottura locale che si manifesta con una sottile linea di frattura sulla superficie.	**3**
15	*Pitting*	Tipo di corrosione localizzata che può portare a perforazioni.	**3**

Tab. 1 Definizione, codice e coefficiente d'intensità di tipiche discontinuità rilevabili su attrezzature a pressione e loro componenti o elementi.

A.2 Controllo Spessimetrico: definizioni ed approccio di base

Le considerazioni che seguono pur avendo valenza di carattere generale sono riferite, per semplicità, ad un'attrezzatura a pressione di geometria elementare (serbatoio). Il controllo spessimetrico consente in via rapida, efficace e facilmente ripetibile, la misura, in uno specifico punto, dello spessore del serbatoio in direzione radiale.

I principi della misura di spessori per contatto diretto di materiali metallici e non-metallici basata sulla rilevazione del tempo di volo di impulsi ad ultrasuoni vengono definiti nella norma *UNI EN 14127 – "Prove Non Distruttive – Ultrasonic thickness measurement"*.

Maglia base e reticolo

Per reticolo si intende la sequenza ordinata e strutturata di una "maglia base", le cui distanze orizzontali e verticali dei vertici, detti "nodi", determinano rispettivamente, con riferimento alla fig. B.1, il passo orizzontale p_o e verticale p_v. Un esempio di reticolo viene di seguito fornito in fig. B.2 dove $n_{i,j}$ è il generico nodo di riga "i" e di colonna "j", ed M ed N sono rispettivamente il numero di righe e di colonne che formano il reticolo.

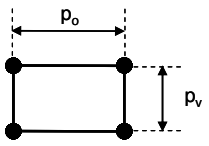


Fig. 2 Maglia base

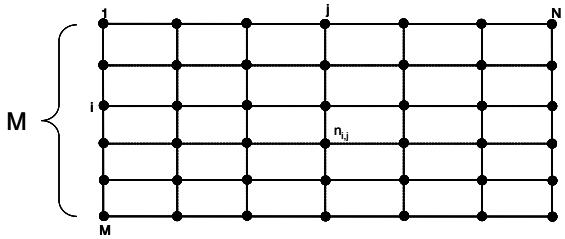


Fig. 3 Reticolo

Punti di misura per controllo spessimetrico

Il controllo spessimetrico di un'attrezzatura a pressione deve essere sempre inteso a reticolo e deve essere condotto sull'intera membratura dell'attrezzatura a pressione (mantello e fondi). I nodi del reticolo individuano i punti di misura da considerare ai fini del controllo spessimetrico.

Il numero delle M righe e delle N colonne costituenti il reticolo e le relative distanze sono fissati in relazione alle finalità del controllo e allo stato della superficie (ove la maglia può avere un passo minore).

Il reticolo del mantello e dei fondi deve essere creato rispettando criteri di simmetria. Un esempio di reticolo costruito per il mantello e per i fondi è dato in Fig. 4.

L lunghezza del mantello
D diametro del mantello e massimo dei fondi
A arco circonferenziale

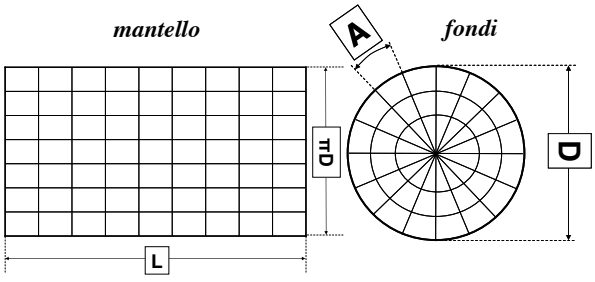


Fig. 4 – Rappresentazione schematica del reticolo virtuale realizzato sul mantello e sui fondi del serbatoio

Dimensioni massime ammissibili della maglia

Il reticolo di misura deve coprire, compatibilmente ai vincoli di accessibilità, l'intera superficie del serbatoio.

Le dimensioni massime ammissibili della maglia costituente il reticolo sono forniti in Tab. 2 per il mantello, e in Tab. 3 per i fondi, ove viene assunta la seguente simbologia:

$p_{long.}$ passo longitudinale,
$p_{circ.}$ passo circonferenziale,
$p_{rad.}$ passo radiale.

Mantello				
Dimensioni massime della maglia	**L ≤ 1000 mm πD ≤ 1000 mm**	**1000<L ≤ 1500 mm 1000 < πD ≤ 1500 mm**	**1500<L ≤ 3000 mm 1500 <πD ≤ 3000 mm)**	**L > 3000 mm πD > 3000 mm**
$p_{long.}$ [mm]	L / 4	L / 5	L / 6	L / i (*)
$p_{circ.}$ [mm]	πD / 4	πD / 5	πD /6	πD / j (**)

Tab. B.1 – Valori massimi ammissibili della maglia per il mantello.

(*) ove i è il minimo intero che verifica la condizione $p_{long.} \leq 500$ **[mm]**

(**) ove j è il minimo intero che verifica la condizione $p_{circ.} \leq 500$ **[mm]**

Fondi			
Dimensioni massime della maglia	**D ≤ 600 mm**	**600 < D ≤ 2500 mm**	**D > 2500 mm**
$P_{rad.}$ [mm]	D / 3	D / 5	D / k (***)
$p_{circ.}$ [mm]	come da Tab. B1 sulla circonferenza massima (saldatura circonferenziale). Per le altre è fissato conseguentemente (****)		

Tab. B.2 – Valori massimi ammissibili della maglia per i fondi

(***) ove k è il minimo intero dispari che verifica la condizione $p_{circ.} \leq 500$ **[mm]**

(****) si osservi che per i fondi, la maglia assume configurazione trapezoidale o addirittura triangolare convergendo verso il centro. Pertanto le indicazioni per pcirc. sono le seguenti: sulla circonferenza massima (indice "0" in corrispondenza della saldatura circonferenziale) si assuma come valore del passo circonferenziale $p^0_{circ.} = A$, essendo A la lunghezza dell'arco indicato in fig. B.5 e pari al valore p_{circ} indicato in Tab. B1, mentre per le circonferenze concentriche via via più piccole si assumano archi circonferenziali $p^i_{circ.}$ delimitati dallo stesso spicchio individuato da A.

Criterio di accettabilità per confronto diretto

Questo criterio implica il confronto dello spessore minimo s_{min} delle misure di spessore $s_{i,j}$ condotte per ogni singolo nodo $n_{i,j}$ del reticolo con quello assunto come minimo ammissibile di efficienza $s_{0,\,eff}$. Posto

$$s_{min} = \min\left[s_{i,j}\right] \qquad (3)$$

l'esito del controllo spessimetrico è positivo quando è verificata la condizione:

$$s_{min} \geq s_{0,eff} \qquad (4)$$

Criterio di accettabilità per confronto combinato

Questo criterio implica un primo confronto tra lo spessore minimo misurato s_{min} e quello minimo statistico s_{st} ottenuto da una valutazione statistica delle misure di spessore condotta su tutti i nodi del reticolo ed un successivo confronto tra il valor minimo dei due, indicato come spessore minimo convenzionale s_c, con quello assunto come minimo ammissibile di efficienza $s_{0,\,eff}$. Per lo spessore minimo s_{min} vale la relazione (3) su definita. Il calcolo dello spessore minimo statistico s_{st} richiede la conoscenza di alcune grandezze tipicamente utilizzate in ambito statistico indicate in Tab. 5.

Qualunque sia il criterio di accettabilità adottato, la sua applicabilità implica la conoscenza del valore dello spessore minimo ammissibile di efficienza $s_{0,eff}$ introdotto in § A.5.

Per attrezzature a pressione contenenti fluidi del Gruppo 1, lo spessore minimo statistico s_{st} si calcola assumendo un livello di confidenza pari al 99,9%, ottenendo:

$$s_{st} = s_m - \left(t_{0.0005,(M\times N)-1} \cdot \sigma\right) \qquad (5)$$

Per attrezzature a pressione contenenti fluidi del Gruppo 2 lo spessore minimo statistico s_{st} si calcola assumendo un livello di confidenza pari al 95%, ottenendo:

$$s_{st} = s_m - \left(t_{0.025,(M\times N)-1} \cdot \sigma\right) \qquad (6)$$

I valori della funzione di distribuzione t di Student per i livelli di confidenza 99,9 % ($t_{\alpha 0.0005,\nu}$) e 95 % ($t_{\alpha 0.025,\nu}$) sono riportati nella Tab. 6

Simboli e/o relazioni di calcolo	Definizione
$M \times N$	numero dei punti di misura totali del reticolo
$s_{i,j}$	spessore dell'i-,j-esimo punto di misura
$s_m = \frac{\sum_{1}^{M}\sum_{1}^{N} s_{i,j}}{M \times N}$	media: valore medio delle M x N misure di spessore
$\sigma = \left[\frac{\sum_{1}^{M}\sum_{1}^{N}(s_m - s_{i,j})^2}{(M\times N)-1}\right]^{0.5}$	deviazione standard : deviazione standard delle M x N misure di spessore
$t_{\alpha/2,\nu}$	valore della funzione t di Student per un livello di confidenza $1-\alpha$ e un numero di gradi di libertà ν
$\nu = (M\times N)-1$	Numero di gradi di libertà
$1-\alpha$	livello di confidenza ovvero probabilità con la quale sarà possibile dichiarare il rispetto del criterio (*per esprimere il livello di confidenza in percentuale moltiplicare per 100*)

Tab. 5 – Variabili utili per il criterio di accettabilità per confronto statistico.

ν	$t_{0.0005,\nu}$	$t_{0.025,\nu}$	ν	$t_{0.0005,\nu}$	$t_{0.025,\nu}$	ν	$t_{0.0005,\nu}$	$t_{0.025,\nu}$	ν	$t_{0.0005,\nu}$	$t_{0.025,\nu}$
1	636,62	12,71	**10**	4,59	2,23	**20**	3,85	2,09	**150**	3,36	1,98
2	31,60	4,30	**11**	4,44	2,20	**30**	3,65	2,04	**200**	3,34	1,97
3	12,92	3,18	**13**	4,22	2,16	**40**	3,55	2,02	**250**	3,33	1,97
4	8,61	2,78	**14**	4,14	2,14	**50**	3,50	2,01	**300**	3,32	1,97
5	6,87	2,57	**15**	4,07	2,13	**60**	3,46	2,00	**400**	3,32	1,97
6	5,96	2,45	**16**	4,01	2,12	**70**	3,44	1,99	**500**	3,31	1,96
7	5,41	2,36	**17**	3,97	2,11	**80**	3,42	1,99	**1000**	3,30	1,96
8	5,04	2,31	**18**	3,92	2,10	**90**	3,40	1,99	**2000**	3,29	1,96
9	4,78	2,26	**19**	3,88	2,09	**100**	3,39	1,98	**5000**	3,29	1,96

Tab. 6 - Valori della funzione di distribuzione t di Student da utilizzare nelle equazioni (5) e (6).

Una volta noto lo spessore minimo statistico s_{st}, si desume lo spessore minimo convenzionale s_c come:

$$s_c = \min\left(s_{min}; s_{st}\right) \qquad (7)$$

Affinché l'esito del controllo spessimetrico sia positivo, deve essere verificata la condizione:

$$s_c \geq s_{0,eff} \qquad (8)$$

Selezione del criterio di accettabilità

La selezione del criterio di accettabilità può essere condotta secondo le indicazioni riportate in Tab. 7, determinate in ragione dell'accessibilità alla membratura dell'attrezzatura a pressione o del passo della maglia del reticolo assunta per la misura degli spessori.

criterio per confronto diretto	criterio per confronto statistico
rilievi spessimetrici eseguibili sulla membratura con accessibilità totale	rilievi spessimetrici eseguibili sulla membratura con accessibilità limitata (coibentazione, ingombri, impedimenti, ecc.)
maglia del reticolo con passo minore o uguale a quello indicato in Tab. 2 e Tab. 3	maglia del reticolo con passo maggiore a quello indicato in Tab. 3 e Tab. 3

Tab. 7 – Criterio di accettabilità raccomandato.

Si sottolinea che l'accessibilità limitata, e quindi la possibilità di trattare i dati del controllo spessimetrico con il criterio per confronto combinato, è indipendente dalla prova di pressione prevista quando ricorrono le condizioni di non completa ispezionabilità dell'attrezzatura a pressione di cui ai commi 4, 5 e 6 dell'art. 12 del D.M. 329/2004.

A.3 Determinazione degli spessori minimi ammissibili di un'attrezzatura a pressione.

Gli spessori minimi ammissibili sono generalmente reperibili *dalla documentazione a corredo dell'attrezzatura a pressione* (per esempio: allegati al libretto ISPESL, fascicolo tecnico, libretto delle verifiche della stessa attrezzatura, disegni e schemi costruttivi finali).

Generalmente, dal disegno costruttivo e/o dalla documentazione a corredo sono desumibili i seguenti dati:

a) spessore nominale s_n [mm],
b) sovraspessore di corrosione s_{sc} [mm],
c) tolleranza di fabbricazione del laminato Δs_f [mm], assunta con segno negativo per ragioni di sicurezza,

noti i quali, lo spessore minimo ammissibile s_0 per l'attrezzatura a pressione è ricavabile come segue:

$$s_0 = s_n - \Delta s_f + s_{sc} \qquad (8)$$

A.4 Velocità di corrosione (rateo)

Da esperienze maturate, per condizioni di esercizio stazionarie è possibile ipotizzare (attraverso specifici riscontri sperimentali, o attraverso indicazioni di letteratura) un avanzamento pressoché lineare della corrosione in ambiente aerato o deaerato con presenza di sostanze aggressive, in termini di "consumo" di materiale, e quindi di spessore, per le zone del componente interessate dal fenomeno. Tale velocità di corrosione viene tipicamente indicata come "rateo di corrosione" e assume valori molto variabili in relazione al materiale di rivestimento, alla tempe-

ratura e alle sollecitazioni cui è sottoposto, ma soprattutto dalla presenza di composti chimici catalizzatori di reazioni di ossidoriduzione.

Senza entrare nello specifico, ipotizzando una velocità di riduzione dello spessore v_{rc} [mm/anno] dovuto a corrosione, l'intervallo di tempo Δt_{cc} [anni] in cui viene a "consumare" lo spessore s_{cc} è dato da:

$$\Delta t_{cc} = \frac{s_{cc}}{v_{rc}} \qquad (9)$$

Analogamente, nota la velocità di corrosione v_{rc}, è possibile ricavare lo spessore s_{cc} prevedibilmente consumato nel periodo di tempo Δt_{cc}, secondo la relazione

$$s_{cc} = v_{rc} \cdot \Delta t_{cc} \qquad (10)$$

ovvero, più concretamente, noti lo spessore minimo misurato s_{min} o quello minimo convenzionale s_c della membratura, la vita residua può essere calcolata dalla relazione:

$$\Delta t_{vr} = \frac{(s_{min}; s_c) - s_0}{v_{rc}} \qquad (11)$$

A titolo indicativo, per attrezzature a pressione in acciaio al carbonio adibite al contenimento di aria compressa, la velocità di corrosione è generalmente assunta pari a 0.05 mm/anno.

E' evidente che nel caso i materiali impiegati per la fabbricazione dell'attrezzatura a pressione abbiano caratteristiche di inossidabilità e siano esclusi problemi di erosione, lo spessore s_{cc} prevedibilmente consumato nel periodo di tempo Δt_{cc}, può essere assunto pari a zero.

A.5 Spessore minimo ammissibile di efficienza

Dal momento in cui occorre accertare l'esercizio in sicurezza dell'attrezzatura a pressione fino al termine del periodo intercorrente la successiva verifica d'integrità, ai fini della valutazione dell'idoneità alla stabilità è necessario fare riferimento ad uno spessore minimo ammissibile di efficienza $s_{0,eff}$ ottenuto dallo spessore minimo ammissibile s_0 (che garantisce la stabilità dell'attrezzatura), incrementato dello spessore s_{cc} che sarà presumibilmente consumato per effetto della corrosione nell'arco dello stesso periodo.

Lo spessore minimo ammissibile di efficienza rispetto al quale deve essere condotto il confronto finale per la verifica d'integrità all'esercizio in sicurezza dell'attrezzatura a pressione, è dunque dato dalla relazione:

$$s_{0,eff} = s_0 + s_{cc} \qquad (12)$$

Qualora, oltre a fenomeni corrosivi, fossero accertate anche azioni erosive, il termine $s_{0,eff}$ dovrà essere corrispondentemente corretto per integrazione, sulla base di specifici rilievi sperimentali o di modellazione sufficientemente validata.

A.6 Declassamento di una attrezzatura a pressione

Qualora nel corso della verifica, e a valle del controllo spessimetrico, risultasse soddisfatta una delle condizioni a) o b):

a) $(s_{min}; s_c) < s_0$

b) $(s_{min}; s_c) > s_0$, ma $(s_{min}; s_c) > s_{0,eff}$

è possibile, tra le altre opportunità previste, declassare l'attrezzatura a pressione in virtù della possibilità di effettuare un intervento tecnico (modifica) che comporti il cambiamento delle ca-

ratteristiche originali, la destinazione e il tipo, o solamente il tipo, ai sensi del comma 1 dell'art. 14 del D.M. 329/2004.

A.7 Determinazione di un nuovo intervallo di tempo per la successiva riqualificazione periodica

Qualora nel corso della verifica, e a valle del controllo spessimetrico, risultassero contemporaneamente soddisfatte entrambe le condizioni a) e b):

a) $\left(s_{min}; s_c\right) > s_0$

b) $\left(s_{min}; s_c\right) < s_{0,eff}$

è possibile, tra le altre opportunità previste, determinare un nuovo intervallo di tempo Δt_i (di ispezione) sicuramente inferiore a quello previsto dalla normativa vigente per la successiva verifica periodica d'integrità, il cui limite massimo si ottiene dalla relazione di seguito indicata:

$$\Delta t_i = \frac{\left(s_{min}; s_c\right) - s_0}{v_{rc}} \qquad (13)$$

ferme restando le posizioni precedentemente definite.

REFERENZE

1 C. De Petris, C. Delle Site, C. Mennuti: "L'esame visivo su attrezzature a pressione ai fini delle verifiche di costruzione e di esercizio.", Linea Guida ISPESL, , Ed. Studi Centrone S.r.l., Gennaio 200

Verifica di integrità di serbatoi tumulati per lo stoccaggio di GPL

S. Benedetto*
P. Chiantella** - G. Chiofalo** - A. Scaglione**
** ASL n°3 di Catania*
*** Raffineria di Milazzo Ram S.C.p.A.*

1. SOMMARIO

Il parco GPL della Raffineria di Milazzo comprende, oltre a cinque serbatoi a sfera, anche otto recipienti a pressione tumulati di grandissime dimensioni, costruiti nel 2001. Secondo quanto previsto dal DM 329/04 in merito alle attrezzature a pressione, si rendeva necessario provvedere, entro il 2011, a svolgere un programma ispettivo idoneo alla verifica di integrità.

Il piano ispettivo adottato, oltre a essere indirizzato a rilevare eventuali meccanismi di danno derivanti dal servizio delle apparecchiature, è stato approntato in modo da supportare una richiesta di deroga presso il Ministero dello Sviluppo Economico, affinché nel 2009, in occasione della fermata dell'Unità FCC, venissero ispezionati solo due su otto serbatoi, mentre per gli altri la scadenza della verifica di integrità venisse prorogata fino al 2014. Infatti, oltre alle ingenti risorse per mettere in atto il piano ispettivo, è da considerare che tali serbatoi svolgono un ruolo strategico per il funzionamento dello Stabilimento e la possibilità di escluderli dall'esercizio è legata al funzionamento delle Unità a maggiore produzione di GPL.

Perseguendo gli obiettivi sopra esposti, sono stati ispezionati (visita interna e CND) durante il periodo ottobre-novembre 2009, un serbatoio adibito allo stoccaggio di propilene anidro, e un altro per prodotti di GPL fuori specifica commerciale, entrambi provenienti dall'Unità FCC.

Nel presente lavoro verranno esposte le considerazioni tecniche con cui è stato compilato il piano ispettivo, le operazioni di bonifica, le attività di preparazione all'ispezione, gli esiti ispettivi e gli aspetti legislativi legati a questa attività.

2. INTRODUZIONE (DESCRIZIONE DEL PARCO GPL- PROVENIENZA DEI PRODOTTI)

I prodotti stoccati nel parco GPL della Raffineria di Milazzo (RAM S.C.p.A) possono essere, a seconda del serbatoio, miscele di GPL (mix GPL), butano, ISO-butano, propano, propilene. Il GPL prodotto viene prevalentemente trasferito verso l'esterno, ovvero commercializzato come combustibile oppure come materia prima per l'industria petrolchimica. Le spedizioni possono avvenire via terra, oppure via mare, per mezzo di navi gasiere, che comunque trasferiscono la percentuale maggiore del GPL commercializzato dalla RAM.

Il GPL può anche essere impiegato per usi interni dello Stabilimento. Immesso nella rete *Fuel Gas* di Raffineria, è inviato come combustibile nei forni eserciti alle più alte temperature, dove per le pregiate metallurgie dei tubi, non possono esse impiegati combustibili meno pregiati *(fuel oil)* che contengono zolfo. È questo il caso dei forni dell'Unità di Steam Reforming per la produzione di idrogeno. Un'altra parte di GPL, l'iso-Butano in particolare, viene impiegato come carica all'impianto di alchilazione, dove, reagendo con i buteni, da luogo a combustibili liquidi

di pregio (iso-ottano). Infine, il GPL può anche essere, in determinate condizioni, addizionato ai combustibili liquidi durante le operazioni di *blending*.

Da questo quadro descrittivo, emerge come le apparecchiature dedicate allo stoccaggio di GPL, rivestano un ruolo strategico per la funzionalità e la produttività della Raffineria di Milazzo. L'intero parco GPL si compone di 5 serbatoi sferici esterni, e di 8 serbatoi cilindrici orizzontali (sigari) tumulati, per una capacità geometrica di stoccaggio complessiva pari a 29036m^3, e una corrispondente capacità operativa di 26386m^3. Le caratteristiche delle singole apparecchiature sono riportate in Tabella 1.

Da un punto di vista della disponibilità dei serbatoi per la funzionalità delle unità produttive dello stabilimento, le apparecchiature che rivestono un ruolo di primaria importanza sono la sfera S155, il serbatoio tumulato V111 e i tre serbatoi del propilene V108-V109-V110. Infatti, la sfera S155 è inserita nel ciclo produttivo dell'Unità Alchilazione, in quanto in essa viene ricircolato l'iso-C4 (iso-butano) utilizzato come carica in tale impianto. Nel serbatoio tumulato V111, confluiscono invece i colaggi dei prodotti gassosi non a norma provenienti dall'unità di Fluyid Cathalitic Cracking (FCC). Infine, nei V108-109-110, viene stoccato il pregiato propilene anidro proveniente sempre dall'Unità FCC, che viene commercializzato, via mare, per l'industria petrolchimica, dove viene impiegato per la produzione del polipropilene isotattico, tramite la catalisi Ziegler-Natta. Proprio per questo particolare impiego, questo prodotto deve rispettare delle specifiche di qualità molto severe, che prevedono, oltre a un'elevata purezza, un contenuto di acqua estremamente basso (<10ppm). In queste condizioni il propilene viene definito: *polymerization grade*. Inoltre, come garanzia di qualità, la Raffineria di Milazzo, ha ottenuto, sulla linea del propilene, la certificazione di qualità ISO 9001.

ITEM	TIPO	PRODOTTO	CAP. Geom. (m^3)	CAP. Oper.va (m^3)
V104	VESSEL-tumulato	MIXGPL	3135	2825
V105	" "	MIXGPL	3135	2825
V106	" "	PROPANO	1626	1451
V107	" "	PROPANO	1626	1451
V108	" "	PROPILENE	3193	2877
V109	" "	PROPILENE	3193	2877
V110	" "	PROPILENE	3193	2877
V111	" "	GPL FUORI NORMA	500	454
S101	SFERA	BUTANO	2145	1993
S102	" "	BUTANO	2145	1993
S103	" "	BUTANO	2145	1993
S155	" "	Iso-BUTANO	1500	1385
S156	" "	BUTANO	1500	1385

Tabella 1: serbatoi del parco GPL della Raffineria di Milazzo

Conseguenze di queste destinazioni d'uso sono che, la disponibilità della sfera S155 è essenziale per il servizio dell'unità Alchilazione, mentre il serbatoio dei prodotti fuori norma V111 e almeno due dei tre serbatoi del propilene sono necessari al funzionamento dell'impianto FCC.

Le considerazioni appena esposte hanno notevolmente condizionato la programmazione delle ispezioni per l'ottemperamento della verifica di integrità, che ha dovuto tenere in considerazione, per non compromettere la produttività della Raffineria, le fermate di Manutenzione programmata dei sopracitati impianti, che hanno subito un *Turn Around* durante l'autunno 2009 (ottobre-novembre).

Focalizzando l'attenzione agli otto vessel tumulati, si ha che queste sono apparecchiature di nuova costruzione, messe in esercizio (verifica di primo impianto) nel 2001. I più grandi, tra cui i tre serbatoi del propilene, hanno dimensioni imponenti, con un diametro di 7m e una lunghezza, calotte semisferiche comprese, di 78m. Nelle foto di Figura 1 e Figura 2, dove sono visibili alcune

fasi della costruzione, e in quelle di Figura 3 e Figura 4, dove si ha l'arrivo a Milazzo via mare e la sistemazione nel parco stoccaggio con posizionamento dello strato di terra, si può comprendere l'imponenza delle apparecchiature.

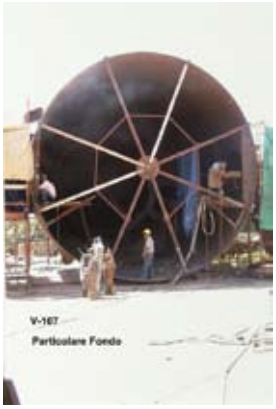


Figura 1: fase di costruzione: calotta



Figura 2: fase di costruzione. CND in pre-servizio



Figura 3: trasporto via mare su chiatta



Figura 4: alloggiamento e sistemazione strato di terra

Le membrature a pressione sono state realizzate in acciaio al carbonio UNI 7382 Fe E355 KT. Inoltre, per prevenire i danneggiamenti derivanti da un possibile servizio in ambiente H_2S umido, le lamiere possiedono dei requisiti aggiuntivi, ovvero sono state realizzate in conformità con la specifica NACE MR0175 [1] , e sottoposte quindi ai test di resistenza per le cricche tipo *Hydrogen Induced Cracking* (HIC), secondo la specifica NACE TM 0284 [2], adottando la soluzione di prova A, caratterizzata da pH 3.

In pre-servizio, durante la fase di fabbricazione, sono stati svolti tutti i controlli previsti dal codice di calcolo utilizzato per la progettazione: raccolte VSR M/S, consistenti in controlli di volume delle saldature: UTD, RT; di superficie: MT, verifica di spessore delle lamiere: UTS. In particolare, le saldature sono state radiografate al 100% prima e dopo il trattamento termico.

Essendo state le apparecchiature messe in servizio nel 2001, la scadenza della verifica di integrità (decennale), secondo quanto previsto dal DM 329/04 [3] , doveva essere fatta entro il 2011. Inoltre, essendo le apparecchiature tumulate e quindi non ispezionabili dall'esterno, si poneva il problema dell'impossibilità di eseguire un'ispezione integrale dall'esterno. A questa situazione si aggiungeva il vincolo, per i serbatoi di stoccaggio propilene, di non poter realizzare la pressatura idraulica, in quanto il prodotto stoccato successivamente all'ispezione, sarebbe stato (anche se il recipiente fosse stato asciugato accuratamente) contaminato con acqua, non rispettando più il valore di 10ppm massimo previsto dalla specifica.

D'altra parte, neppure la possibilità di eseguire un collaudo pneumatico, eventualità comun-

que prevista dal DM 329/04, poteva essere considerata una soluzione perseguibile, in quanto le misure di sicurezza necessarie, avrebbero comportato l'evacuazione di un'area talmente ampia, visto le dimensioni dell'apparecchiatura e quindi i volumi coinvolti, da estendersi al di fuori dello Stabilimento, con la conseguenza di interrompere la viabilità lungo la vicina Strada Provinciale.

La necessità, per i serbatoi del propilene, di mantenere condizioni asciutte all'interno, per non compromettere il prodotto, ha condizionato anche le operazioni di bonifica. Infatti, non potendosi impiegare acqua per spiazzare il gas, la bonifica è stata effettuata con azoto.

Tutti questi elementi hanno influito notevolmente sull'organizzazione delle ispezioni. Innanzitutto, essendo improponibile verificare gli otto serbatoi in un'unica soluzione, sia per le ingenti risorse necessarie, sia per non interrompere il servizio di un'unità importante come l'FCC, si è approfittato dell'MTA prevista per l'autunno 2009, per eseguire i controlli sul V111, serbatoio GPL fuori norma e V110, serbatoio del propilene. La strategia messa a punto prevedeva infatti di eseguire le ispezioni su questi due tumulati, e, sulla base dei risultati delle ispezioni, approntare una richiesta di deroga al Ministero dello Sviluppo Economico, affinché la scadenza per la verifica di integrità per gli altri serbatoi venisse prorogata di 3 anni, ovvero dal 2011 al 2014, e quindi in corrispondenza della prossima fermata programmata per l'FCC. Un'ulteriore richiesta di deroga all'MSE, in occasione dell'ispezione di autunno 2009, ha riguardato la possibilità di svolgere ispezioni alternative, ai fini della verifica di integrità, alla prova di pressione (idraulica o pneumatica).

Lo studio RBI, svolto in accordo con lo standard API 581 [4] sull'intero impianto GPL, ha rappresentato un valido e riconosciuto supporto, da parte del MSE, in occasione della richiesta della deroga per le ispezioni alternative alla pressatura idraulica e per la posticipazione di tre anni della verifica di integrità per le apparecchiature non ispezionate nel 2009.

In questo lavoro, verrà descritto, in dettaglio, come è stato organizzato il piano di controlli per l'intero gruppo di serbatoi tumulati: definizione dei meccanismi di danno, compilazione del piano ispettivo con il supporto dell'analisi RBI, esito ispettivo dei tumulati ispezionati in autunno 2009, richieste di deroghe al MSE.

3. DEFINIZIONE DEI MECCANISMI DI DANNO

I meccanismi di danneggiamento riscontrabili sui i serbatoi adibiti allo stoccaggio di GPL sono rappresentati essenzialmente da [5] corrosione acida (sour water), tensocorrosione da idrogeno solforato, corrosione esterna o da sotto coibente. Oltre all'influenza del materiale, tali meccanismi traggono origine in parte dal fluido stoccato (ambiente di servizio), e, in parte, dall'ambiente esterno in cui sono collocate le apparecchiature. Da tenere presente, inoltre, che i meccanismo sopra elencati sono stati confermati anche dall'analisi RBI, e hanno rappresentato quindi la base sulla quale sono stati realizzati i piani ispettivi di dettaglio. Una breve descrizione di questi meccanismi di danno è di seguito riportata.

a) **Corrosione acida (sour water).** In generale, consiste in una forma di danneggiamento localizzato [5], determinato dalla presenza di acqua in fase liquida contenente significative quantità di idrogeno solforato e/o acidi organici, inorganici ed ammoniaca (condense acide). Parametri operativi per determinare la severità del danneggiamento sono la temperatura, la pressione, il pH. Questa tipologia di corrosione si manifesta, per l'acciaio al carbonio, sotto forma di perdita uniforme di spessore che risulta più marcata nelle zone dove maggiore è la turbolenza del fluido, mentre come corrosione localizzata nelle aree di ristagno. Il pH delle condense acide può essere inoltre abbassato dalla presenza di CO_2 ed acidi organici. I ratei di corrosione previsti o calcolati per questa tipologia di danneggiamento variano da 0,05 a 0.2 mm/anno.

b) **Tensocorrosione da idrogeno solforato e acqua (wet H_2S).** Come ampliamente riportato in letteratura [6], la presenza simultanea di H_2S (anche pochi ppm) e soluzione acquosa nel fluido di processo, favorisce, negli acciai al carbonio, la diffusione di atomi di idrogeno all'interno del materiale, che determina, a seconda dei casi, una serie di danneggiamenti noti come: HIC (Hydrogen Induced Cracking), SOHIC (Stress Oriented Induced Cracking), SSC (Sufide Stress Cracking). Tra questi la tenso-corrosione SSC si verifica in prossimità dei giunti saldati, con maggiore incidenza su quelli non sottoposti a trattamento termi-

co di distensione ed a maggiore durezza (>22HRC o >200 HB) [7], [8]. Nell'impianto in oggetto, i fluidi trattati, ormai prodotti finiti, si possono considerare esenti dalla presenza di H_2S. Conseguentemente, il meccanismo di danno è stato considerato possibile sui serbatoio dei prodotti fuori norma, V111 e su un *vessel*, non tumulato, dei drenaggi: V112, che comunque non è coinvolto nelle problematiche affrontate in questa memoria, e che non è stato neppure oggetto di richiesta di deroghe.

c) Corrosione esterna. In relazione alle condizioni ambientali (vicinanza al mare, presenza di nebbie saline) [5] i componenti a temperature di esercizio inferiori a 120°C sono stati considerati soggetti anche a corrosione esterna. Particolare attenzione, da questo punto di vista, è stata dedicata alla valutazione della corrosione esterna sui serbatoi interrati, per il fatto che queste apparecchiature sono dotate di un rivestimento esterno a spruzzo, tipo vernice epossidica senza solventi, con uno spessore compreso tra 2000µm e 2500µm, e protezione catodica a correnti impresse; precauzioni che limitano fortemente la velocità di corrosione.

4. PIANO ISPETTIVO: IL SUPPORTO DELL'ANALISI RBI

Nella definizione della strategia ispettiva, tramite il supporto dell'analisi RBI, sono stati definiti un **livello di rischio tollerabile**, e un **orizzonte temporale** rispetto al quale proiettare l'andamento del rischio, che come prevede l'analisi RBI, viene calcolato nei due casi con e senza attività ispettiva. Per quanto riguarda il rischio tollerabile, si è considerato il livello massimo di 10^{-5} eventi/anno. Si ricorda che nell'analisi RBI, con il termine di **evento incidentale**, si intende la perdita di integrità della membratura a pressione (*pressure boundary*) e conseguente rilascio verso l'esterno del fluido.

Riguardo gli orizzonti temporali, facendo riferimento anche all'intenzione dell'Utilizzatore di richiedere presso il Ministero dello Sviluppo Economico deroga per la posticipazione della verifica di integrità di tre anni, è stato considerato il limite del 2014, rispetto al quale è stato calcolato il rischio associato all'esercizio dei serbatoi con e senza ispezioni, oltre che alla valutazione dello stato attuale dell'impianto, ovvero nel 2009.

I dati utilizzati come input nella definizione del livello di rischio in corrispondenza dei sopra descritti orizzonti temporali, hanno tenuto in considerazione anche le condizioni di esercizio, il fluido contenuto, i materiali. Di solito si tengono in considerazione anche le schede storiche relative alle precedenti ispezioni. In questo caso, non essendo i serbatoi mai stati ispezionati in precedenza, sono stati considerati semplicemente i CND in pre-servizio.

I risultati dell'analisi di rischio possono essere così sintetizzati:

- **Stato attuale: 2009**. nessun item dell'impianto GPL è risultato in condizioni di alto rischio. Nella classifica, i sette *item* a maggior rischio risultano il serbatoio GPL fuori norma V111, il *vessel* dei drenaggi (V112) e le sfere di stoccaggio GPL. Inoltre, gli unici item che presentano un livello di rischio maggiore al *target* prefissato sono il V111 e il V112. Questa situazione è sintetizzata in Tabella 2.

ITEM	Descrizione componente	Livello di rischio
V111	Tumulato-prodotti fuori norma	MEDIO-ALTO
V112	Vessel esterno-serbatoio drenaggi	MEDIO
S155	Sfera Iso-C4	MEDIO
S156	Sfera –C4mix	MEDIO
S101	Sfera –C4mix	MEDIO
S102	Sfera –C4mix	MEDIO
S103	Sfera –nC4	MEDIO

Tabella 2: classifica di rischio. Situazione corrente: 2009.

- **Proiezione 2014-senza ispezione**. In questa proiezione risultano 185 *item* (il numero comprende anche numerose linee) che superano il livello di target prefissato. Comunque, un solo *item*, ovvero il serbatoio prodotti fuori norma V111, viene a trovarsi in condizioni di ALTO rischio.
- **Proiezione 2014-con ispezione.** A seguito di intervento ispettivo, nel 2014 non si ha alcun *item* con corrispondente livello di rischio ALTO, o che comunque supera il livello di *target* prefissato.

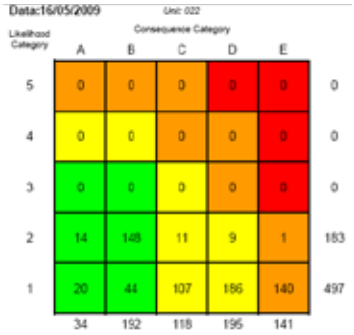


Figura 5: Matrice di Rischio. Situazione corrente



Figura 6: Matrice di Rischio. 2014-senza ispezione

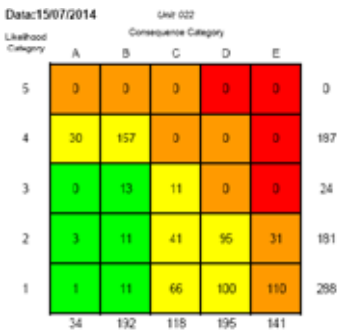


Figura 7: Matrice di Rischio. 2014-con ispezione

Nelle Figura 5, Figura 6 e Figura 7 sono rappresentate le tre matrici di rischio che rappresentano questi risultati.

A seguito di quanto emerso dall'anali RBI, risultando gli *item* a cui era associato il maggior livello di rischio il V111 e il V112, è stata impostata la seguente strategia ispettiva. Approfittando della fermata dell'Unità FCC nel periodo Autunno 2009 (ottobre-novembre), si è pensato di aprire e ispezionare il serbatoio dei drenaggi V111 e un serbatoio di propilene V110. Il V112, non essendo un serbatoio interrato e non comportando nessun problema ispettivo, non è stato incluso in questo programma ispettivo, poiché è ispezionabile in qualsiasi momento, e, peraltro, non è stato oggetto di alcuna richiesta di deroga.

La scelta di ispezionare il V110, sebbene non fosse considerato un *item* ad alto rischio, è servita, come vedremo, per supportare la deroga per la posticipazione delle verifiche di integrità.

Il piano ispettivo derivante dall'analisi RBI, per le apparecchiature V111 e V110, è sintetizzato in Tabella 3:

V110	Esame visivo interno al 100% di superfici e accessori. Controllo MT da interno del quarto inferiore del 50% delle saldature circonferenziali e delle saldature degli anelli di irrigidimento interni. Controllo MT e UTD da interno di tutte le saldature dei bocchelli. Controllo UTD ed MT del 50% degli incroci (un metro per parte) delle saldature circonfernziali con le longitudinali, compreso le sagome di composizione delle calotte. In aggiunta a quanto previsto dall'analisi RBI: misura di spessore spessore tramite scansione continua con T-Scan, su n° 6 fasce circonferenziali, di larghezza 1m, distribuite per la lunghezza di tutta l'apparecchiatura.
V111	Controllo MT del quarto inferiore di tutte le saldature circonferenziali e delle saldature degli anelli di irrigidimento interni. Controllo MT e UTD da interno delle saldature dei bocchelli. Controllo MT e UTD da interno del 100% degli incroci tra saldature circonferenziali e longitudinali, compreso le sagome di composizione delle due calotte. In aggiunta a quanto previsto dall'analisi RBI: misura di spessore spessore tramite scansione continua con T-Scan, su n° 4 fasce circonferenziali, di larghezza 1m, distribuite per la lunghezza di tutta l'apparecchiatura.

Tabella 3: V110 e V111: piano ispettivo.

Come è stato evidenziato in Tabella 3, in aggiunta al piano ispettivo scaturito all'analisi RBI, ottenuto considerando i meccanismi di danno sopra descritti, sono stati eseguiti delle misure di spessore con scansione continua tramite il T-Scan. Come sarà spiegato al par. 6, questo ulteriore controllo è servito per supportare la richiesta di deroga, presso l'MSE, alla prova di pressione.

I piani ispettivi sono graficamente rappresentati in Figura 8 e Figura 9.

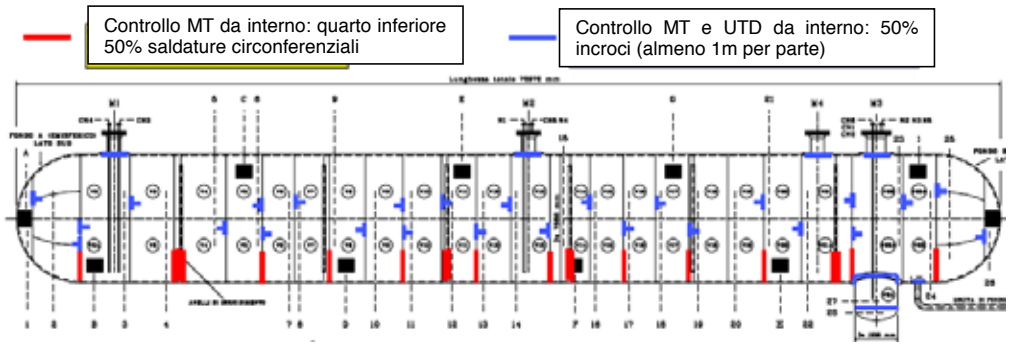


Figura 8: V110: rappresentazione del piano ispettivo

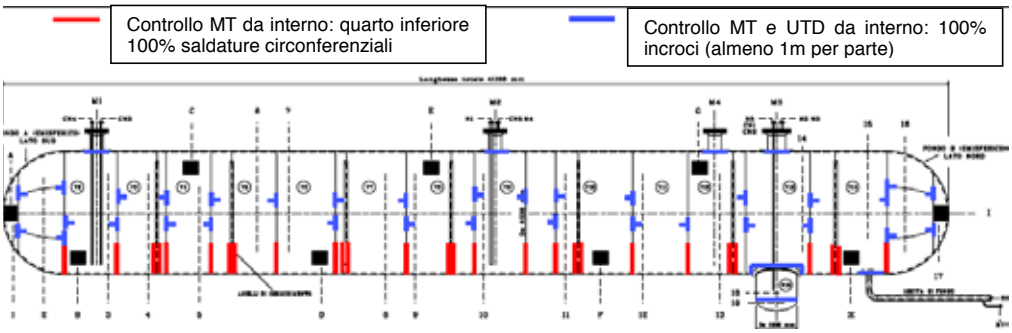


Figura 9: V111: rappresentazione del piano ispettivo

5. ISPEZIONE INTERNA PER VT E CND

Una volta stabilito il piano ispettivo, idoneo, come si è visto, sia a verificare i danneggiamenti derivanti dai meccanismi di danno predetti, che per supportare le deroghe da presentare all'MSE, si è proceduto all'organizzazione delle ispezioni, rispettando le linee guida previste dallo standard API 572 [9]. Come anticipato, gli *item* ispezionati sono stati il V111 e il V110, nel periodo ottobre-novembre 2009, in concomitanza con la fermata dell'impianto FCC. Benché non oggetto della presente memoria, si ritiene opportuno riportare che, contemporaneamente ai due serbatoi tumulati V110 e V111, è stata ispezionata, sempre per verifica di integrità, la sfera S155. Ciò ha comportato l'organizzazione di CND, con relativa costruzione di ponteggi e preparazione delle superfici da sottoporre a controllo, per un totale di 450 m di cordoni di saldatura da controllare con UTD, 840 m con MT, e 195 m^2 ca di scansione continua con T-Scan, il tutto da svolgere in un intervallo di tempo non superiore a 40 giorni.

A queste difficoltà, si è aggiunta, come già accennato, il problema della **bonifica del serbatoio del propilene V110**, per il quale non poteva essere impiagata acqua, per non alterare i requisiti di qualità del prodotto. Per ovviare a questo problema è stata messa a punto una procedura di inertizzazione con azoto, e, a seguito delle attività ispettive, l'essiccamento dello stesso.

Nell'ambito della bonifica del V110, il primo intervento, iniziato dopo la depressurizzazione del recipiente, ha avuto la finalità di creare un'atmosfera inerte nel serbatoio, per potere immettervi aria all'interno senza rischio di esplosioni. Si è proceduto quindi a rendere l'apparecchiatura abitabile internamente. Alla fine delle attività all'interno del serbatoio, è stata eseguita un'operazione di essiccamento, con la tecnica a soffietti, immettendo azoto a temperatura >35°, per cinque cicli di pressione fino a 5bar, con depressurizzazione intermedia fino a 1 bar.

Inoltre, a differenza degli altri serbatoio, dove le superfici sono state preparate per mezzo di idro-sabbiatura, sempre per evitare il problema dell'acqua, sul V110 le superfici sono state pulite per mezzo di sabbiatura a secco.

Dopo tutti i preparativi necessari, le ispezioni sono state eseguite, secondo i piani di controllo preparati, senza registrare anomalie non riconducibili a difetti di costruzione.

6. ASPETTI LEGISLATIVI: RICHIESTE DI DEROGHE DA PARTE DEL MSE

Come è stato anticipato nell'introduzione, l'organizzazione dei controlli sui serbatoi tumulati di GPL, è passata attraverso la richiesta di due deroghe da parte del Ministero dello Sviluppo Economico.

La prima, riguardava la possibilità di non eseguire la prova di pressione (idraulica o pneumatica) per le apparecchiature V110 e V111, che, essendo tumulate, non erano accessibili da esterno e quindi non ispezionabili integralmente da esterno e da interno, secondo quanto richiesto dall'art. 12 del DM 329 [3]. Pertanto, come previsto dal punto 5 dell'art. 10 del citato DM 329/04, l'Utilizzatore, sulla base di un'attenta valutazione del rischio connesso con i meccanismi di danno ritenuti possibili sulle apparecchiature, considerazioni già svolte in occasione dell'analisi RBI e sottoposte alla verifica di un Organismo Notificato, ha presentato richiesta all'MSE affinché la prova di pressione, ad integrazione dell'ispezione visiva, fosse sostituita da ispezioni alternative, avendo dimostrato, nelle proprie valutazioni tecniche, che queste garantivano lo stesso livello di protezione della prova di pressione.

Nell'altra richiesta, che si appoggia sempre sul punto 5 dell'art. 10 del citato DM 329/04, l'Utilizzatore ha chiesto all'MSE di prolungare la scadenza della verifica di integrità sulle apparecchiature non ispezionate nel periodo ottobre-novembre 2009, in modo che il termine di tale Riqualificazione Periodica, previsto per il 2011, fosse posticipato di 3 anni, ovvero fino al 2014, in concomitanza con la prossima fermata programmata per l'Unità FCC. Anche in questo caso l'Utilizzatore è stato tenuto a dimostrare, che il livello di rischio, nella proiezione fino al 2014 a seguito interventi ispettivi nel 2009, si mantenesse entro livelli accettabili. Come discusso al par. 4, questa condizione è stata già dimostrata a seguito l'analisi RBI, sebbene lo studio specifico condotto dall'Utilizzatore, sia stato verificato da un O.N. prima dell'invio della pratica al Ministero. Per quest'ultima richiesta, l'Utilizzatore ha dovuto presentare anche gli esiti dei controlli svolti in pre-servizio sulle apparecchiature.

Entrambe le richieste hanno avuto esito positivo.

7. CONCLUSIONI

Si è visto, in questa memoria, le problematiche che si sono riscontrate durante l'organizzazione e l'attuazione di un piano ispettivo per eseguire le verifiche di integrità su dei serbatoi di GPL tumulati di grandi dimensioni. I risultati ritenuti più rilevanti, a seguito di questa valutazione, sono i seguenti:

- Dalla campagna di controlli eseguita, non è emersa alcuna anomalia, ne, più in particolare, difetti riconducibili ai meccanismi di danno preventivati;
- Il piano ispettivo derivante dall'analisi RBI è risultato molto cautelativo per un duplice motivo: a) le apparecchiature non erano mai state ispezionate precedentemente (mancanza di storia ispettiva); b) il piano di controlli necessitava di essere particolarmente esteso, per supportare le richieste di deroghe;
- L'analisi RBI, si rivela un mezzo efficace e riconosciuto per eseguire previsioni del rischio e dimostrare, ai fini delle richieste di deroghe alle prescrizioni del DM 329/04, che questo si mantenga, entro determinati orizzonti temporali, al di sotto di limiti accettabili.

8. BIBLIOGRAFIA

1 NACE MR 0175: Metals for Sulphide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking Resistance in Sour Oilfield Environments, 2003;

2 NACE MR 0284: Nace Std TM 0284, Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steel for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking, 2003;

3 Decreto 1 Dicembre 2004, n° 329; Regolamento Recante Norme Per la Messa in Servizio ed Utilizzazione delle Attrezzature a Pressione e degli Insiemi di cui All'art. 19 Del Decreto Legislativo 25 Febbraio 2000, n°93; Ministero Attività Produttive (ex MSE).

4 API Std 581, Risk Based Inspection Document Resource, first edition, may 2000, American Petroleum Institute;

5 API Std 571: Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, first edition, 2003.

6 NACE Standard RP0296 - Guideline for Detection, Repair, and Mitigation of Cracking of Existing Petroleum Refinery Pressure Vessels in Wet H_2S Environments, Item No. 21078, 1996,

7 G. Chiofalo, E. Guglielmino, V. Gazzotti; Valutazione dell'estensione dei fenomeni di danneggiamento da "wet H_2S" nelle apparecchiature di una raffineria di petrolio; Atti del convegno: Giornate Nazionali sulla Corrosione e Protezione. Messina 20-21-22 Giugno 2007;

8 API Std 581. Risk Based Inspection Document Resource. Appendix H: Basic Data Required for Analysis of stress Corrosion Cracking, American Petroleum Institute;

9 API Std 572, Inspection of Pressure Vessel, second edition, February 2001, American Petroleum Institute;

sessione TEMATICA
INTEGRITÀ STRUTTURALE DI MATERIALI E COMPONENTI

Affidabilità e sicurezza di esercizio di generatori di vapore eserciti oltre i 45 anni in centrali termoelettriche di potenza – esperienze operative

*M. Larice**
*G. Frare***
*L. Tardivo****

** ISPESL Dipartimento di Udine*
***A2A Produzione – Servizi tecnici (Marghera)*
****A2A Produzione – RSPP Centrale di Monfalcone*

1. SOMMARIO

La gestione di generatori di vapore installati e messi in funzione in centrali termoelettriche nella prima metà degli anni sessanta ha richiesto, nel corso dell'esercizio, una serie di interventi e di controlli finalizzati a mantenere un adeguato livello di sicurezza e affidabilità, anche a seguito dell'entrata in vigore di disposizioni che hanno stabilito l'obbligatorietà delle verifiche su parti di impianto che erano escluse da obblighi specifici; d'altra parte, le stesse verifiche obbligatorie tendono ad essere sempre più accurate in considerazione dell'età delle attrezzature poste sotto controllo; nella presente memoria viene proposta l'esperienza maturata presso la centrale termoelettrica di Monfalcone (GO) in merito ai controlli ed agli interventi posti in essere o previsti per mantenere un adeguato livello di sicurezza in impianti nei quali sono presenti generatori di vapore che risultano eserciti da circa 45 anni e che sono alimentati, come combustibile principale, da carbone. Tra le principali problematiche affrontate rientrano lo scorrimento viscoso, gli interventi di riqualificazione periodica sulle tubazioni, la valutazione dell'eventuale degrado delle caratteristiche del materiale con cui è stato costruito il corpo cilindrico; vengono trattate le modalità di effettuazione dei controlli e viene data un'indicazione in merito alle valutazioni ed alle scelte tecniche operate anche in relazione alle esigenze produttive.

2. PRESENTAZIONE DELL'IMPIANTO

La centrale termoelettrica di Monfalcone è situata nel comune di Monfalcone (GO) a circa 20 Km da Trieste; è composta da quattro gruppi di produzione elettrica, per una potenza installata totale di 960 MW, di cui:

– le prime due unità (gruppi 1 e 2, installati per primi) da circa 160 MW cadauno
– le altre due unità (gruppi 3 e 4, di installazione più recente) da 320 MW cadauno

I primi gruppi installati, funzionanti a carbone, risalgono alla seconda metà degli anni '60 e sono entrati in funzione rispettivamente nel 1965 e nel 1970. Successivamente, nel 1983 e 1984, sono entrati in funzione i gruppi 3 e 4.

La Centrale adotta un sistema di Gestione Ambientale che ha ottenuto la certificazione secondo la norma UNI EN ISO 14001 nel 2001.

Per promuovere il miglioramento continuo delle prestazioni ambientali, nonché l'informazione al pubblico, la centrale ha inoltre aderito al sistema comunitario di ecogestione e audit denominato "EMAS" ottenendo la registrazione n° IT000068 in data 31 luglio 2001; nel 2008



Figura 1 – Localizzazione dell'impianto



Figura 2 – Vista dei generatori di vapore da 160 MW (Gruppi 1 e 2)

è stato avviato l'impianto di riduzione delle emissione di solfati (denominato "desox") con lo scopo di rientrare nei parametri definiti dalle disposizioni vigenti.

2.1. Gruppi 1 e 2

Le unità comprendono un generatore di vapore idoneo per essere alimentato con carbone misto ad una quota di biomasse oppure olio combustibile denso; i principali dati tecnici sono riportati di seguito:

- Tipo: Corpo cilindrico
- Circolazione: naturale
- Producibilità: 509 t/h
- Pressione di progetto (vapore surriscaldato): 165 kg/cm^2
- Pressione di progetto (vapore risurriscaldato): 45/48 kg/cm^2
- Temperatura vapore surriscaldato e risurriscaldato: 540 °C
- Camera di combustione: Depressione
- Posizione bruciatori: Tangenziali

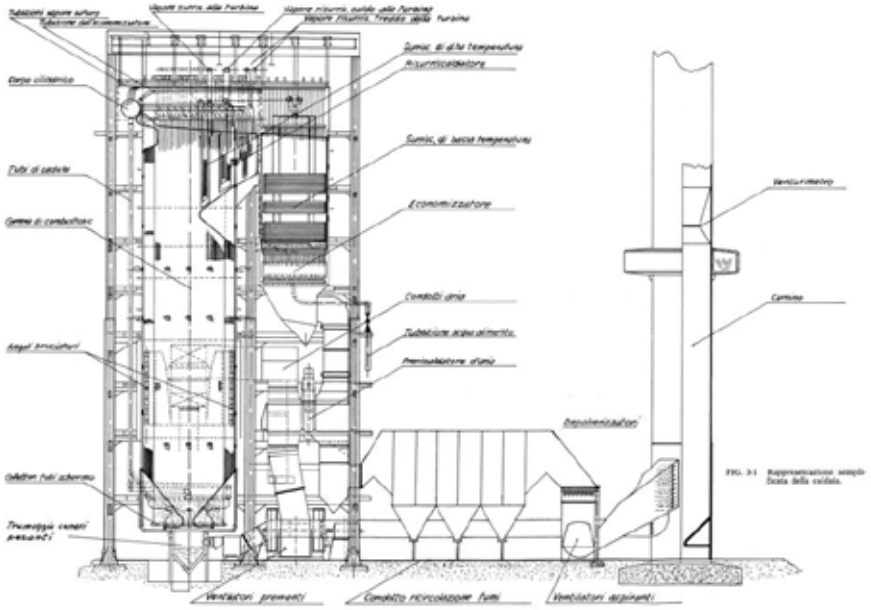


Figura 3 - Sezione trasversale del Generatore di vapore da 160 MW

2.2. Gruppi 3 e 4

Le unità comprendono due generatori di vapore idonei per essere alimentati esclusivamente con olio combustibile denso; i principali dati tecnici sono riportati di seguito:

- Tipo: UP
- Circolazione: Forzata
- Producibilità: 1022 t/h
- Pressione di progetto (vapore surriscaldato): 195 kg/cm^2
- Pressione di progetto (vapore risurriscaldato): 50 kg/cm^2
- Temperatura vapore surriscaldato e risurriscaldato: 540 °C
- Camera di combustione: Pressurizzata
- Posizione bruciatori: Fronte/retro

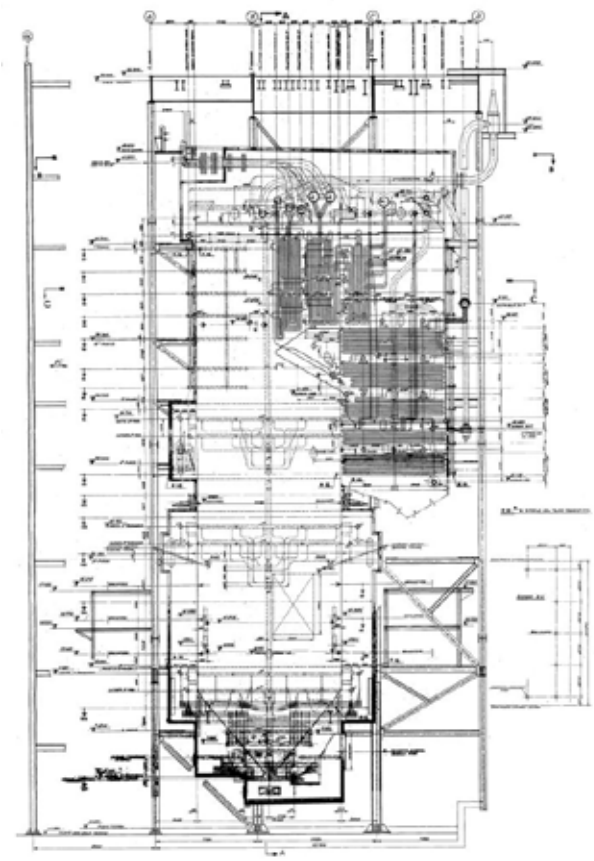


Figura 4 - Sezione trasversale del Generatore di vapore da 320 MW

3. EVOLUZIONE E STORIA DEGLI OBBLIGHI DERIVANTI DALL'ADEMPIMENTO A DISPOSIZIONI VIGENTI IN MATERIA DI VERIFICHE

La gestione dell'esercizio di impianti che presentano le caratteristiche descritte in precedenza ha richiesto una continua attenzione ad una serie di problematiche che hanno interessato in particolare i singoli generatori di vapore o, più in generale, l'impiantistica che attiene al ciclo termico nel suo complesso e quanto sopra si è concretizzato in attività afferenti la valutazione periodica delle condizioni di integrità di componenti o parti di impianto; da un punto di vista

pratico, le problematiche affrontate in ordine di successione temporale sono riassumibili nei termini seguenti:

- scorrimento viscoso
- riqualificazione delle tubazioni
- degrado dell'integrità dei componenti principali

ed hanno interessato le membrature del generatore o elementi di impianto come riportato di seguito:

3.1. Scorrimento viscoso

Le procedure di valutazione ed i conseguenti controlli, avviati nel 1992, si sono rivelati nel tempo eccessivamente onerosi dal punto di vista delle tempistiche connesse alle fermate ed alle relative attività; sono stati sostanzialmente superati a seguito della sostituzione, (realizzata nel 2004 per il gruppo 1 e nel 2005 per il gruppo 2) di tutte le membrature principali interessate dal fenomeno in quanto la valutazione tecnico economica dell'investimento ha portato a ritenerlo preferibile rispetto all'ipotesi di prosecuzione delle operazioni di controllo periodico (circa 4 settimane di fermata ogni 3 anni); sono stati quindi sostituiti i componenti di cui al seguente elenco:

- Collettore uscita surriscaldatore BT
- Collettore entrata surriscaldatore AT
- Collettore uscita surriscaldatore AT
- Collettore uscita risurriscaldatore AT
- Desurriscaldatori e linee di collegamento entrata/uscita agli stessi

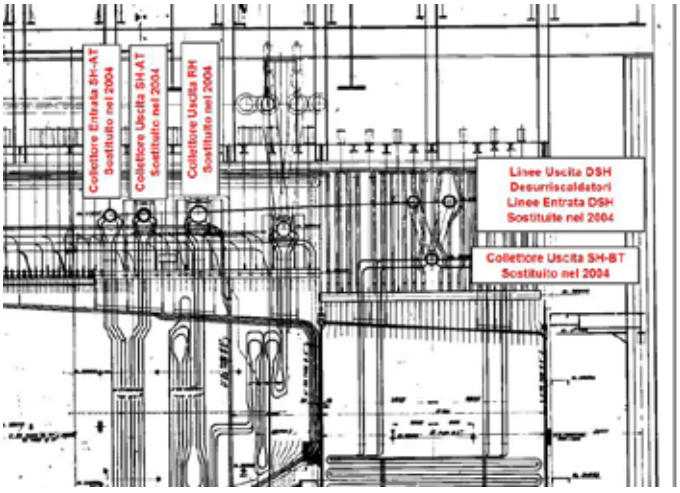


Figura 5 - Schema sostituzione membrature



Figura 6 - Montaggio collettori AT: vista dall'esterno del generatore



Figura 7 - Montaggio collettori AT: vista dalla camera morta

3.2. Riqualificazione delle tubazioni

Con l'entrata in vigore del DM 1.12.2004, n. 329, per ottemperare alla scadenza imposta dall'Art. 16 del decreto, è stata avviato già a partire dal 2005 un censimento delle tubazioni e recipienti per liquidi con l'obiettivo di individuare quelle che rientrano negli obblighi stabiliti dal decreto; a seguito del censimento, è stata avviata una campagna di controlli non distruttivi e le conseguenti valutazioni relative allo stato di conservazione ed efficienza; l'operazione è stata portata a termine nel 2008 sulle tubazioni indicate nell'elenco riportato di seguito, uniche rientranti negli obblighi stabiliti dal Decreto:

- vapore principale
- vapore risurriscaldato caldo e freddo
- spillamenti turbina ai preriscaldatori AP
- collettori pompe alimento
- alimentazione Olio Combustibile Denso (OCD)

I piani di controllo sono stati predisposti considerando parametri di esercizio e progetto, materiali costruttivi, fluido di processo, geometria spaziale e locale delle tubazioni, sistemi di sospensione e vincolo, possibili meccanismi di danno e risultati di precedenti controlli/ispezioni; in accordo a quanto previsto dal Decreto succitato, è stata trasmessa la denuncia all'ISPESL che ha già provveduto all'esame della documentazione e al sopralluogo in impianto.

3.3. Degrado dell'integrità dei componenti principali

La membratura interessata è il corpo cilindrico superiore, sul quale a breve sarà eseguita una campagna di controlli non distruttivi, che faranno seguito a quelli posti in essere già nel 2001, finalizzati in particolare a stabilire se vi siano in atto meccanismi di danneggiamento o fenomeni di degrado delle caratteristiche del materiale con il quale è stato realizzato il componente.

4. PIANIFICAZIONE DEI CONTROLLI SUL CORPO CILINDRICO SUPERIORE

Come accennato, dopo un primo monitoraggio effettuato nel 2001, è in fase di definizione una campagna di controlli accurati su tutti gli elementi del componente.

4.1. Descrizione del componente

Il Corpo Cilindrico Superiore è posizionato all'interno della camera morta superiore, a ridosso della parete frontale, e le due estremità fuoriescono dalle pareti laterali; la superficie esterna è accessibile quasi completamente attraverso la camera morta, mentre le due estremità sono accessibili dall'esterno, previa scoibentazione; l'accessibilità interna è resa possibile attraverso i due passi d'uomo posizionati sui fondi di estremità.

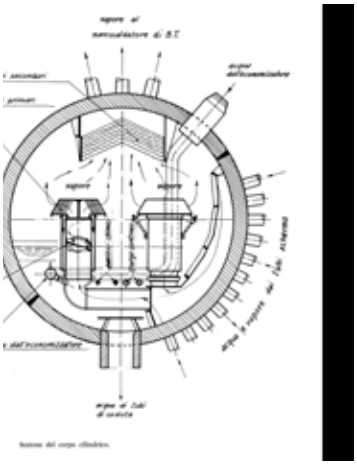


Figura 8 – Sezione del corpo cilindrico

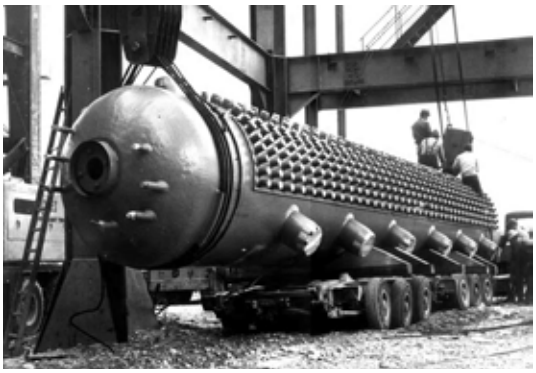


Figura 9 – Arrivo in cantiere del corpo cilindrico del Gruppo 1 (1964)

4.1.1. Caratteristiche costruttive

Il Corpo Cilindrico Superiore è formato dall'unione di quattro virole, ricavate dalla calandratura di lamiere con due diversi spessori, mediante saldature longitudinali e circonferenziali; i fondi di estremità sono forgiati di pezzo con il mantello. Le principali caratteristiche sono:

- Costruttore: Phoenix-Rheinrohr
- Anno di entrata in servizio: 1965
- Temperatura di bollo: 350 °C
- Pressione di bollo: 165 kg / cm2
- Raggio esterno: 912 / 915 mm
- Spessore nominale: 74 / 80 mm
- Lunghezza totale: 15.100 mm
- Materiale del fasciame: CuNi52Mo
- Materiale bocchelli tubi caduta: 15Mo3

4.1.2. Caratteristiche funzionali

Il Corpo Cilindrico Superiore è alimentato dall'acqua alimento proveniente dall'economizzatore e dalla miscela acqua-vapore proveniente dai tubi evaporatori e svolge le seguenti funzioni:

- separare il vapore dall'acqua per essiccarlo;
- assorbire temporaneamente, con le oscillazioni di livello, lo squilibrio di portata tra acqua e vapore durante i transitori e le variazioni di richiesta di vapore, funzionando da polmone idraulico;
- mantenere le caratteristiche dell'acqua di caldaia entro i limiti prescritti, anche con lo scarico, attraverso lo spurgo continuo, di acqua contenente impurezze arricchitesi con la vaporizzazione;
- permettere l'introduzione di condizionanti chimici.

Gli elementi interni al Corpo Cilindrico, finalizzati allo svolgimento delle funzioni sopra indicate, sono sinteticamente costituiti da:

- incamiciatura a tenuta, che ha lo scopo di realizzare una intercapedine tra superficie interna del mantello e l'acqua mista a vapore che ha già percorso i tubi evaporatori;
- separatori a ciclone il cui compito è separare l'acqua dal vapore; in essi alcune eliche imprimono alla miscela un moto rotatorio e l'acqua si porta verso l'esterno ricadendo in una intercapedine, mentre il vapore procede verso l'alto;
- separatori a lamierini ondulati molto ravvicinati, che dirigono il vapore entro un percorso tortuoso e fanno aderire contro i lamierini le particelle d'acqua trascinate;
- essiccatori a rete che asportano ogni traccia di acqua ancora presente nel vapore da avviare ai collettori del passaggio posteriore;
- tubazioni varie quali: tubazioni di alimento (che distribuiscono in maniera uniforme, tramite idonee forature, l'acqua alimento in arrivo dall'economizzatore), tubazioni di alimento chimico (attraverso le quali vengono immessi i reagenti necessari per il condizionamento chimico dell'acqua di caldaia), tubazione di spurgo continuo (attraverso la quale viene effettuato lo spurgo dell'acqua di caldaia per mantenere le caratteristiche di questa entro i limiti prescritti), tubazione di prelievo campioni (attraverso la quale è possibile estrarre campioni di vapore saturo, per controllarne la purezza);
- passi d'uomo, uno per ogni estremità.

Sull'esterno del Corpo Cilindrico sono visibili ed accessibili i seguenti componenti:

- attacchi dei tubi di adduzione acqua dall'economizzatore;
- attacchi dei tubi di caduta che portano l'acqua all'anello alimento inferiore e da qui ai tubi schermo;
- attacchi valvole di sicurezza;
- attacchi di tubi vari quali: tubi di adduzione della miscela acqua-vapore, tubi di uscita vapore saturo secco al passaggio posteriore, tubi spurgo continuo, tubi presa campione, tubo vapore ausiliario, tubi sfiato, tubi di livello, tubo alimento chimico.



Figura 10 – Vista esterna corpo cilindrico da camera morta



Figura 11 – Vista interna corpo cilindrico: forature ingresso miscela acqua-vapore



Figura 12 - Vista esterna corpo cilindrico: saldature di attacco bocchelli di attacco bocchelli tubi di caduta

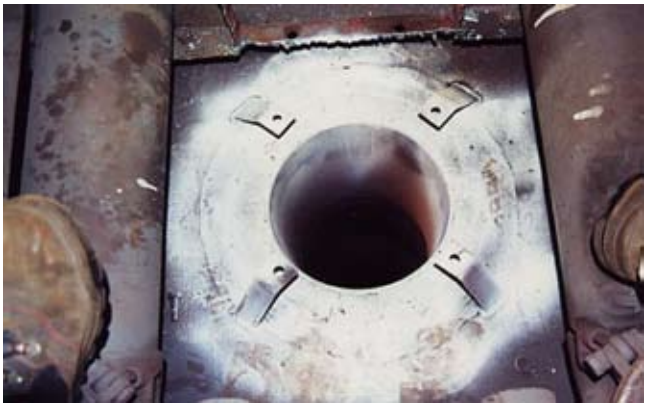


Figura 13 - Vista interna corpo cilindrico: saldature tubi di caduta

4.2. Meccanismi di danno

I fattori che possono dare luogo a danneggiamento del componente sono riconducibili ai fenomeni riportati di seguito:

- Corrosione delle superfici esterne: può interessare la superficie esterna nell'eventualità, peraltro improbabile, di danneggiamento della coibentazione.
- Corrosione/erosione delle superfici interne: può verificarsi su zone localizzate per effetto di usura dovuta ai flussi oppure per deviazioni nei parametri dell'acqua
- Fatica termo meccanica: per effetto combinato della pressione e dell'azione termica del fluido
- Sovrasollecitazioni: indotte da eventuali dilatazioni termiche impedite o limitate, soprattutto nelle fasi di transitorio.
- Degrado delle caratteristiche del materiale.

4.3. Esami programmati

Sul corpo cilindrico superiore è stata programmata l'esecuzione delle seguenti tipologie di esame in accordo anche alle indicazioni generali della Circolare ISPESL 60/97. In tutti i casi possibili, oltre agli esami strumentali è previsto anche l'Esame Visivo diretto.

Per garantire l'efficacia degli esami descritti nel seguito, legata strettamente alla comoda accessibilità dei dettagli costruttivi, è stato programmato lo smontaggio e l'estrazione di tutti gli ingombri interni, lo smontaggio parziale di lamiere del liner e di filtri vapore e la scoibentazione dei fondi di estremità.

Le superfici saranno adeguatamente preparate per il tipo di controllo previsto e gli esami saranno svolti con estensione statistica, tale da garantire la rappresentatività degli stessi. Tra le tipologie di esame vi sono:

- Controlli di superficie: Esame Visivo (VT), Esame Magnetoscopico (MT) e/o con Liquidi Penetranti (LP) efficaci per evidenziare eventuali difettosità affioranti e/o in sviluppo dalla superficie esterna e anomalie geometriche.
- Controlli di integrità strutturale: Esame Ultrasonoro Spessimetrico (UTS) efficace per evidenziare l'integrità della parete metallica.
- Controlli di volume: Esame Ultrasonoro Difettoscopico (UT) efficace per evidenziare eventuali difettosità in sviluppo dalla superficie interna e/o dall'interno dello spessore.
- Controlli di integrità microstrutturale: Esame Metallografico per Replica (ST) e Misure di durezza (HT) efficaci per evidenziare eventuali anomalie metallurgiche.
- Controlli di rispondenza del materiale: Analisi Chimica (AC) efficace per la determinazione degli elementi di lega caratteristici e di impurezze.

Infine, a seconda delle parti considerate, sono previste attività specifiche:

4.3.1. Esami su materiale base

Sul fasciame del Corpo Cilindrico Superiore si prevede di eseguire i seguenti esami:

- Esame Ultrasonoro Spessimetrico;
- Esame Metallografico per Replica;
- Misure di durezza;
- Analisi Chimica.

4.3.2. Esami su saldature di composizione

Sulle saldature longitudinali e circonferenziali di composizione del fasciame si prevede di eseguire i seguenti esami:

- Esame Magnetoscopico;
- Esame Ultrasonoro Difettoscopico;
- Esame Metallografico per Replica;
- Misure di durezza.

4.3.3. Esami su saldature di bocchelli / tronchetti

Sulle saldature di attacco al mantello dei diversi bocchelli / tronchetti e di altre parti non in pressione si prevede di eseguire l'Esame Magnetoscopico.

Tale Esame interesserà statisticamente le saldature di attacco al mantello dei seguenti bocchelli / tronchetti:

- tubi di caduta;
- tubi di arrivo acqua dall'ECO;
- valvole di sicurezza;
- tubi presa campioni;
- tubi sfiato;
- tubi livello;
- spurgo continuo;
- tubazione vapore ausiliario;
- tubo alimentazione reagenti chimici;
- tubi uscita vapore saturo;
- passi d'uomo.

Si prevede che gli stessi esami saranno eseguiti anche su saldature di attacco al mantello di parti non in pressione (tiranti di sostegno, staffe di supporto dettagli interni, ecc.).

Limitatamente a bocchelli di tubi di caduta si prevede di eseguire anche Esami Ultrasonori Difettoscopici ed Esame Metallografico per Replica.

4.3.4. Esami su forature

Su forature di ingresso miscela acqua-vapore e su forature uscita vapore saturo si prevede di eseguire statisticamente Esami Magnetoscopici, che interesseranno la parete cilindrica delle forature stesse e i legamenti delle medesime.

5. CONCLUSIONI

Nella seguente tabella è riportato, in maniera sintetica, il prospetto dei controlli previsti in corrispondenza alla tipologia specifica di parte del componente sul quale approfondire l'indagine; l'effettuazione dei controlli è programmata in occasione della fermata primaverile dell'impianto.

Elemento	Tipologia di esame
Materiale Base	UTS, ST, HT, AC
Saldature del fasciame (longitudinali e circonferenziali)	MT,UT, ST, HT
Saldature bocchelli/tronchetti	MT, (UT ed ST solo su bocchelli di tubi di caduta)
Forature	MT

Tabella 1 – Prospetto dei controlli sugli elementi del corpo cilindrico superiore

Valutazione della vita residua di materiali in regime di scorrimento viscoso a caldo di una attrezzatura a pressione con strumentazione di misura e controllo di processo conforme alla Norma CEI EN 61508 (SIL): risultati dell'applicazione reale in un impianto di raffineria

G. Picciolo*(1)
A. Tonti**
A. Barison***
** TÜV Rheinland Italia*
*** ISPESL - Roma*
****SARPOM - Trecate*

1. RIASSUNTO

Lo Studio presentato si riferisce ad un nuovo approccio per la stima della vita residua di materiali in esercizio alle condizioni di *creep* a caldo. E' applicato il criterio del controllo/monitoraggio di opportune variabili di processo rappresentative dello stato di integrità del materiale. L'applicazione è stata condotta su materiali che costituiscono parti di una colonna di distillazione dell'Impianto VACUUM della Raffineria SARPOM di Trecate. Lo schema della metodologia è basato sostanzialmente sulla stima del rischio di superamento di condizioni critiche di processo che possono condurre al superamento della vita di progetto dei materiali con conseguenze non accettabili (Top Events). Al superamento della vita di progetto è associata, pertanto, una frequenza di accadimento ed una soglia di accettabilità, in base al livello delle conseguenze che ne conseguono. Lo schema di monitoraggio richiede che siano rispettati determinati vincoli sulla Qualità delle informazioni che costituiscono la base di valutazione dello stato di integrità dei materiali: *Accuracy* e *Security*. Questi parametri devono concorrere ai criteri di conformità ai requisiti di progetto ed esercizio dei sistemi di misura e controllo delle Norme CEI EN 61508/61511; in altre parole, ne devono essere verificati anche i livelli di affidabilità (SIL). Lo schema comporta una analisi di rischio dell'Unità di impianto e relativo target di sicurezza, nonché la conoscenza della legge di invecchiamento dei materiali nel transitorio di superamento di soglie critiche delle variabili di processo significative. L'approccio probabilistico basato su statistiche e stime predittive di particolari parametri di affidabilità consente di stimare ad ogni istante, a partire da una condizione iniziale (in cui sia noto lo stato di integrità dei materiali) la probabilità di superamento della vita utile; quindi di stimare, ad intervalli di tempo specificati, la necessità di condurre analisi dirette (repliche).

La metodologia può costituire anche un metodo predittivo per una nuova installazione.

2. INTRODUZIONE

Il quadro normativo in cui si inseriscono le verifiche "di vita residua" è basato sostanzialmente sulla circolare ISPESL n.48/2003.

Relativamente alle "valutazioni preliminari" i calcoli devono essere effettuati sulla base dei

fattori di danno dipendenti dal tempo (scorrimento viscoso, fatica, corrosione, ecc) presenti sul componente, individuando tutti i fattori di degrado legati all'esercizio del componente. Inoltre devono essere disponibili dati misurati o valutati, risultanti da documentazione probante, riguardanti le effettive condizioni di esercizio (pressione, temperatura, tempo, numero di avviamenti e spegnimenti, fluidi, ecc).

In seconda approssimazione, la stima della frazione di vita consumata (tenuto conto, eventualmente dell'azione combinata di scorrimento viscoso-fatica oligociclica) è effettuata sulla base dei dati storici di pressione, temperatura e periodi di esercizio e sulla base della regola lineare di danneggiamento:

$z_s = \Sigma_{i,n}\ h_i/H_i$

dove:

- i indicizza le coppie di pressione e temperatura (opportunamente discretizzate in funzione del grado di affinamento dell'analisi) alle quali il componente ha effettivamente lavorato;
- n è il numero delle predette coppie;
- h_i è il tempo di esercizio effettivo trascorso alla i-ma coppia di pressione-temperatura;
- H_i VT alla i-ma coppia di pressione-temperatura, determinata sulla base del diagramma bilogaritmico definito in [7].

A supporto ed integrazione delle informazioni di cui più sopra, la metodologia presentata si pone l'obiettivo di stimare la frequenza di superamento (in uno specificato intervallo di tempo) della vita di progetto del materiale ad un determinato istante di tempo dalla messa in servizio, sulla base del numero e relative modalità di superamenti della soglia di criticità per la variabile critica.

Se, quindi si dimostra, che le possibilità di accadimento di questi eventi ha una "bassa" probabilità tale da ritenerla trascurabile o, quantomeno, accettabile per il rischio che ne deriverebbe dal superamento della vita di progetto (od anche che non si può verificare per le proprie ragioni di processo intrinseco e/o cause esterne) ne risulta che è assicurata la vita almeno alle condizioni di progetto fino a quell'istante considerato.

La metodologia proposta è applicata ad una specifica unità di processo: Colonna di distillazione dell'Impianto VACUUM C 1 ed relativamente a materiali eserciti ad alta temperatura in regime di scorrimento viscoso a caldo.

La identificazione della/e variabili di processo significative costituisce la fase determinante per lo sviluppo delle fasi successive. Nel caso specifico, è stata identificata la variabile di processo VUU0024 rappresentativa della temperatura del materiale oggetto dello studio (Fondo Colonna).

Lo studio è stato condotto con il supporto e la collaborazione del Personale di Raffineria per le specifiche competenze.

3. I CRITERI BASE DELLA METODOLOGIA DI STIMA DELLA VITA RESIDUA – IL MONITORAGGIO DELLE VARABILI DI PROCESSO

Un'unità di processo è un sistema complesso di componenti classificabili come attrezzature elettriche, strumentazione, strutture meccaniche, apparecchiature in pressione e attrezzature di sicurezza dell'impianto. Nelle unità di processo in cui sono presenti componenti soggetti a fenomeni di invecchiamento nel tempo per stress termici e meccanici, quali le attrezzature a pressione in regime di *creep*, il controllo e misura del processo assumono un peso significativo per una gestione in sicurezza dell'Unità. In particolare, i sistemi di regolazione automatica ed i sistemi di allarme e blocco assicurano che non siano superate determinate soglie di sicurezza.

La valutazione del livello di affidabilità (SIL) delle misure/controlli potrà essere definito sulla base della *riduzione* (SIL = 1/RRF: Risk Reduction Factor) del rischio di superamento - in un determinato orizzonte temporale - di parametri critici di stabilità dei materiali in condizioni di esercizio specifiche: vita utile.

Lo schema sviluppato è basato, pertanto, sul concetto di *riduzione del rischio* mediante una *funzione di sicurezza strumentata* (Safety Instrumented Function: SIF) a cui è associato un Livello di integrità di sicurezza: SIL (Safety Integrity level) che coincide con la disponibilità di

misure e/o controlli di processo affidabili (*"certe"*). Le Norme di riferimento sono, pertanto, la IEC 61508 e IEC 61511.

Le attività condotte vertono su tre tematiche principali con l'obiettivo di garantire uno strumento di gestione di specifici dati di processo che rispettino i seguenti requisiti:

- la *security,*
- l'*accuracy,*
- la *integrity*.

Per quanto riguarda l'aspetto della "security" è verificata la pratica impossibilità che i dati resi disponibili dalla strumentazione di misura e controllo dell'Impianto per le necessarie elaborazioni e valutazioni possano essere manipolati ma possano essere processati solo da Funzioni aziendali preposte ed autorizzate all'opportuno livello.

Per quanto attiene gli aspetti in oggetto e vincoli che ne derivano per assicurare il necessario livello di "security" la memorizzazione dei dati utilizzabili è riportata nel software proprietario (POIS 2) che è gestito da foglio elettronico (Microsoft). E' evidente da quanto sopra che, se pur il flusso informativo dei dati è accessibile dal solo "sistemista" che può intervenire sul programma (Figura 1: source) non è escludibile la possibilità di manipolazione dei dati riportati (VPS). Infatti, tutte le misure significative devono essere filtrate ed i dati relativi a periodi di fermata devono essere eliminati, poiché non significativi ai fini della stima delle effettive ore e condizioni di esercizio.

Il secondo requisito attiene la necessaria *precisione* della misura nei limiti richiesti per la rappresentatività dello stato del materiale. La precisione delle misure riveste un ruolo fondamentale allorché le temperature siano al disopra della temperatura di *inizio creep*.

Il terzo requisito è relativo al livello di "Sicurezza Funzionale" (Functional Safety) del sistema di misura e/o controllo automatico. Questi sistemi assicurano, infatti, le *Funzioni di Sicurezza* (Safety Functions: SF): monitoraggio/controllo di specifiche variabili di processo. Alla Funzione di Sicurezza è associato un SIL (Safety Integrity Level: SIL) ed una opportuna metrica probabilistica (Probability of Failure per Hour: PFH, Average Probability of Failure on Demand: PFDavg) secondo quanto riportato nella IEC /EN 61508-1 [1] e IEC/EN 61511-1 [2].

La valutazione del livello di Integrità delle misure di processo (Affidabilità delle misure che realizzano la Funzione di sicurezza) costituisce oggetto dello Studio.

4. DESCRIZIONE DEL SISTEMA OGGETTO DELLO STUDIO

Unità di Processo oggetto dello studio: Colonna distillazione atmosferica 23C1. In particolare, i materiali soggetti in esercizio alle condizioni di temperatura nel campo di creep a caldo.

Sulla base delle informazioni del progetto e della tecnologia del processo l'Impianto è stato suddiviso in "blocchi funzionali" ai fini di cui sopra:

Fondo Colonna 23 - C1 dell'Impianto VPS (Vacuum) ed interfaccia con il Forno F 660 di preriscaldo della Carica alla Colonna di distillazione:

- Sezione Forno F- 660
- Unità Colonna 23-C1

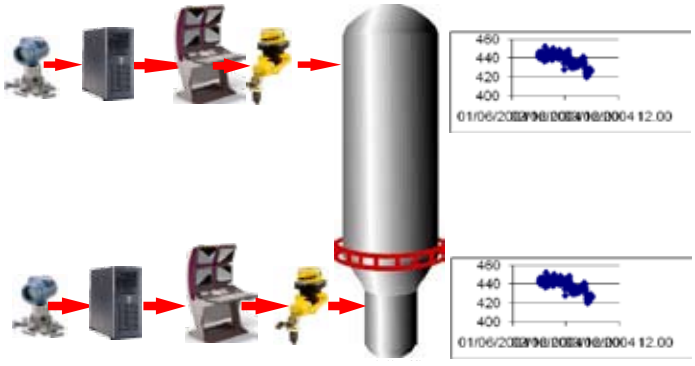


Figura 2 – Loops di misura e controllo della temperatura dell'effluente: 23– TCV -001 Fondo Colonna 23 C1 e misura VUU024

e relativamente al Fondo Colonna: il "Fondo Inferiore – Cono inferiore (Virole I – IV : misura **VUU002** e controllata **VUT001**) "Top Wash zone" (sopra la griglia in corrispondenza della V virola) misura **VUU024** che è direttamente correlata alla variabile temperatura di ingresso carica alla colonna controllata VUT001 e misurata VUU002 e Tronchetti Passo d'Uomo (M4) .

L'interfaccia funzionale delle due unità è una linea di carica colonna dell'effluente Forno (nodo).

5. DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEI DATI DI PROCESSO E STIMA DEL SIL DELLA FUNZIONE DI SICUREZZA REALIZZATA

Il sistema di Misura e Controllo delle variabili di processo della Colonna 23-C1 è HONEYWELL – TDC 2000 Gate Highway.

Lo schema di base del controllo delle variabili di processo è costituito da loops non ridondati .In genere le misure controllate e misurate sono costituite da loops indipendenti. In particolare, le misure VUT001 e VUU002 sono, la prima, acquisita dal sistema di controllo automatica che fornisce anche la variabile misurata; mentre la misura di temperatura VUU002 è acquisita da un sistema indipendente (Centralina di temperature). Nelle Figure 3 e 4 sono riportati gli schemi di disponibilità di loops di misura e di blocco strumentati

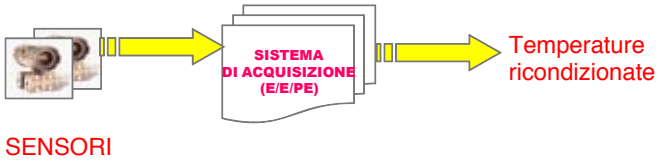


Figura 3 – Tipico schema funzionale di un sistema di acquisizione, elaborazione di variabili di processo.

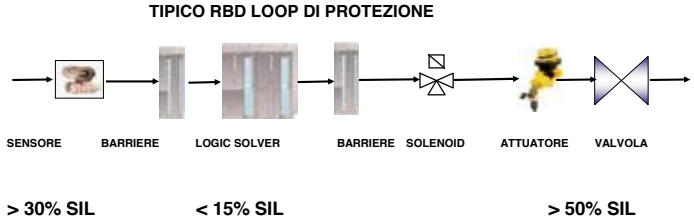


Figura 4 – Tipico schema funzionale di un sistema di blocco di processo e ripartizione della percentuale di indisponibilità sul range del SIL.

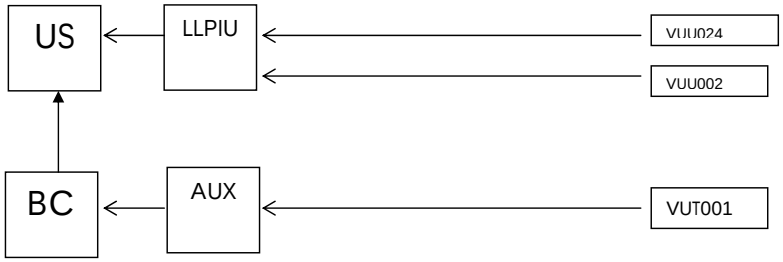


Figura 5 – Schema funzionale del sistema di acquisizione, elaborazione di variabili di processo (misure).

LEGENDA:
- *US: UNIVERSAL STATION*
- *LLPIU: LOW LEVEL PIU (Cabinet dedicato all'acquisizione delle temperature)*
- *AUX: Cabinet dedicato alla conversione delle misure mV/mA (Convertitori)*
- *BC: Basic Controller (Unità di elaborazione logica ed ausiliari per le Funzioni di elaborazione delle misure di processo: misura e controllo)*

6. VARIABILI SIGNIFICATIVE PER IL MONITORAGGIO DELLE CONDIZIONI DI ESERCIZIO DEI MATERIALI DELLA COLONNA 23- C1 IN REGIME DI CREEP A CALDO.

Dall'analisi di processo condotta con il supporto della Tecnologia ed Esercizio e sulla base della schematizzazione a blocchi funzionali sono state definite le variabili significative interessate oggetto dello studio, sulla base dei riferimenti di cui in [4] ed in particolare la temperatura VUU024: la temperatura di fondo colonna 23 -C1 con particolare riferimento al "Fondo Inferiore – Cono inferiore (Virole I – IV: misurata VUU002 e controllata VUT001) e "Top Wash zone", sopra la griglia in corrispondenza della V virola) misurata VUU024 che è direttamente correlata alla variabile temperatura di ingresso carica alla colonna controllata VUT001 e misurata VUU002 e Tronchetti Passo d'Uomo (M4) . Le variabili VUT001 e VUU002 sono classificabili come *dirette* dal punto di vista del controllo automatico relativamente alla temperatura dell'effluente Forno. La temperatura 23 –VUT – 001 IC (Effluente uscita Forno) è in controllo di *cascata* con 23-TCV – 660- IC (Controllo temperatura Fondo Colonna 23 C1). La variabile significativa per la stima dell'andamento della temperatura nel tempo relativa ai materia in regime di *creep* è assunta la VUU024. Dall'analisi di processo emerge che il controllo e monitoraggio di temperatura dell'effluente**:** 23– TCV -001 non può, tuttavia, costituire "la Funzione di Sicurezza" (a cui sia associata una metrica SIL: PFH) quindi, una barriera di controllo contro il superamento del target di vita Utile del materiale in regime di creep. Infatti, il controllo della 23– TCV -001 *non assicura* che non si possano verificare superamenti locali di temperatura dei materiali della colonna oltre i limiti di progetto [4] fermo restando che tutte le temperature di Colonna non possono superare la temperatura massima controllata dell'effluente Forno. Il controllo della 23– TCV -001 assicura che non sia superata la temperatura max di uscita effluente Forno, che in caso di superamento della soglia di allarme, consente all'Operatore in Sala Controllo l'intervento di blocco forno (non automatico). In caso di disservizio del controllo di temperatura uscita Forno (altissima) il transitorio non può condurre a condizioni di temperatura superiori a questa per il tempo dell'up set che, in generale, è rivelato in sala controllo anche da altre variabili correlate (Figura 6). Una insufficiente *accuracy* della variabile di processo può determinare un effetto di sovratemperatura non rivelata.

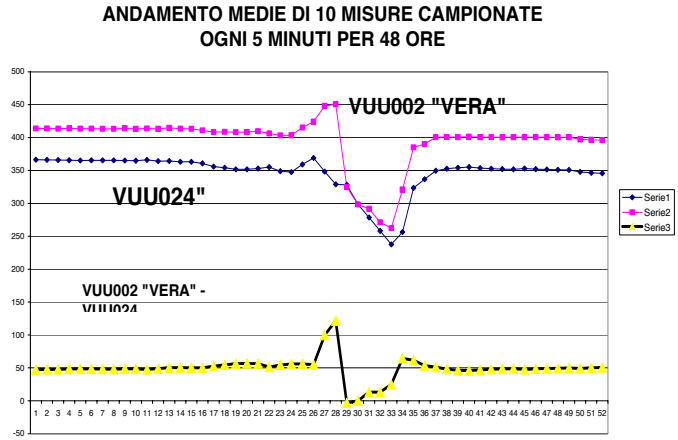


Figura 6 – Andamento temperatura "vera" ingresso Carica (VUU002) fondo Colonna C 23 C1 (VUU024) e differenza. Periodo 48 ore: 11-01-2004/0,05-13-01-2004/0,00 – valori medi di 10 misure

7. SIGNIFICATIVITÀ DELLA MISURA VUU024 QUALE INDICATORE DELLA TEMPERATURA DEI MATERIALI IN ESERCIZIO

La variabile di temperatura VUU0024 *non è* misurata con un sistema ridondante come la VUU002; quindi la sua misura non può essere assunta sempre attendibile nei limiti della precisione richiesti (accuracy).

In generale, la correlazione tra le misure VUT001 e VUU024 è *molto alta* (> 99% - Figura 7) per cui, in assenza di eventi transitori di lunga durata, può essere valutato possibile utilizzare la VUT001 (VUU002) in alternativa alla VUU024.

Si evidenzia che l'eventuale analisi di correlazione può comportare una necessaria valutazione dell'errore di stima della variabile correlata con impatto, anche significativo, sull'attendibilità del monitoraggio, dipendendo dal livello di temperature di esercizio dei materiali. Da osservare che la correlazione fra le misure della temperatura effluente Forno (VUT001) e fondo colonna VUU024 non sono sempre correlate in determinate condizioni di upset (Figura 6).

Come risulta evidente dal grafico di figura 8, almeno dal giugno 2008 al dicembre 2008, la misura *non è significativa* per il monitoraggio della temperatura dei materiali. Ciò conduce, evidentemente alla considerazione che l'Unità può esere gestita mediante altre misure disponibili. Nella Figura 9 sono invece, riportati gli andamenti medi giornalieri delle VUT001 e VUU024 in brevi periodi (cento medie giornaliere a partire dal giugno 2000 al luglio 2008) ed infine nei grafici della Figura 10 sono riportati i trend dei valori delle medie giornaliere e del differenziale delle medie della VUT001 e VUU024 e nelle Figure 11a, 11b i valori delle medie giornaliere dal gennaio 2000 a luglio 2008.

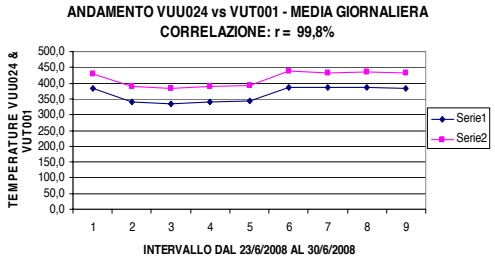


Figura 7 – Correlazione tra la misura VUU024 e VUT001

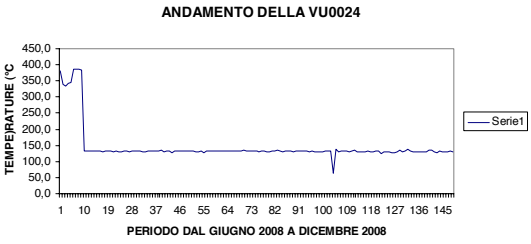


Figura 8 – Andamento della temperatura VUU0024 dal giugno 2008 al dicembre 2008.

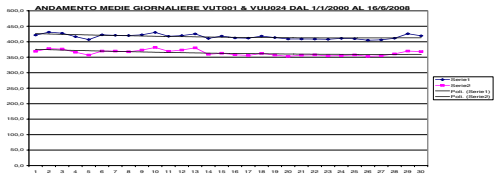


Figura 9 – Andamento medie giornaliere VUT001 e VUU024 dal 1/6/2000 al 16/6/2008

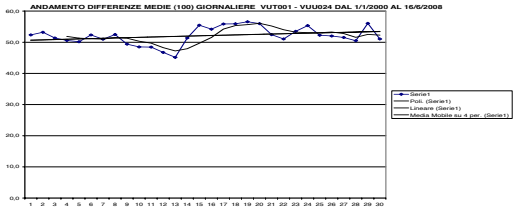
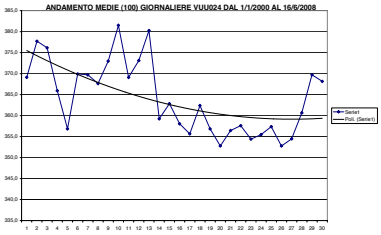
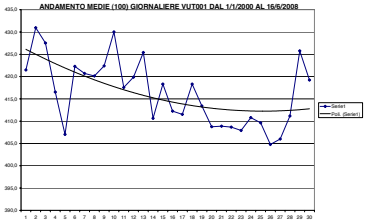


Figura 10 – Andamento trend medie giornaliere VUT001 e VUU024 e differenziale dal 1/1/2000 al 16/6/2008



a



b

Figura 11 – Andamento medie giornaliere VUU024 (a) e VUT001 (b) dal 1/1/2000 al 16/6/2008

8. VERIFICA DEL LIVELLO DI SICUREZZA FUNZIONALE (SIL) DEL LOOP DI CONTROLLO VUT001 E DI MISURA VUU002

Il livello di sicurezza Funzionale (SIL) del sistema di misura in oggetto a singolo canale non rientra nel livello SIL 1 in accordo alla Tabella 5 della Norma CEI EN 61511-1, §11.4 (Basic Control non ridondato). Pertanto il valore di $PFH_d = \lambda^*$ non può essere inferiore a 10^{-1} (1/y). Dallo schema riportato in Figura 12, se indichiamo con $p_{Top\ Event}$, il disservizio pericoloso di controllo di temperatura effluente Forno, con p_{VUT001} la probabilità di disservizio non rivelato di altissima temperatura effluente, p_{VUU002} la probabilità di disservizio non rivelato di allarme di altissima temperatura effluente e HE, la probabilità di mancato intervento dell'Operatore su allarme per mancato intervento in Sala Controllo di *"Altissima Temperatura effluente Forno"* od anomalia di temperatura Colonna, risulterà:

$PFH_d = \lambda^* = 2 \times (\lambda_{VUT001}) \times [\lambda_{VUU002} \times (TI/2 + MTTR)] + \lambda_{CCF}$ (1)

dove tutti i fattori sono indipendenti ed un tempo di missione TI assunto annuale.

Il fattore λ_{CCF} corrisponde alla frequenza (frazione del guasto sistematico assunto come casuale) che contribuisce alla stima di λ^* per staratura comune della T/C del loop VUT001 e VUU002.

Lo schema di stima della frequenza di superamento della temperatura di progetto dei materiali (o di altra temperatura critica ai fini del creep) è definito da una condizione di guasto del controllo non rivelato (solo alla verifica periodica assunta annuale) o di guasto di modo comune relativamente al loop di misura e controllo (λ_{VUT001}, λ_{VUU002}).

In questa condizione si osserverebbe un lento incremento di temperatura sia dell'effluente Forno (VUT001, VUU002) rispetto al set point, sia delle altre temperature correlate e non controllate della colonna (Figura 10 VUU024, VUT001).

Dal Database HONEYWELL risulterà per il loop di controllo della temperatura uscita effluente VUT001 (Tabella 1)

ELEMENT	DANGEROUSFAILURERATEUNDETECTED: λ_{du} [1/h]	DATA SOURCE
Generic thermocouple,	3,E-06 (1)	EXIDA.COM
Basic controller - Honeywell Gateway	0,2E-6	APPENDIX A3
mV/mA (RTD/mA) converter	3,681E-9	APPENDIX A3
Valvole di controllo	2,74E-07 (lower)/4,4E-07 (mean)	CCPS

Tabella 1 – Datai di riferimento per i componenti del loop di misura e controllo VUU024 e VUT001
(1) Normalmente il guasto più frequente della termocoppia è l'apertura del giunto caldo.

$PFH_{VUT001.} = \lambda_{VUT001} = \lambda_{T/C} + \lambda_{mV/mA} + \lambda_{BC} + \lambda_{Valves}$ ffi 5e-6 (1/h), assumendo che il loop di controllo sia realizzato con più valvole pneumatiche.

La stima riportata corrisponde alla frequenza di guasto non rivelato di controllo della temperatura di effluente forno.

La stima corrisponde alla valutazione del guasto non rivelato PFH di un sistema BPCS [1] nel campo del SIL 1. Poiché, il vincolo architetturale della Funzione di sicurezza è limitata dal Basic Controller che non è ridondato ([2]-1, §11.4, Tab. 5), il valore massimo del PFH = 1E-5 (1/h).

Analogamente, risulterà:

$PFH_{VUU002} = \lambda_{VUT002} = \lambda_{T/C} + \lambda_{mV/mA} + \lambda_{BC}$ ffi 4e-6 (1/h)

La stima corrisponde alla valutazione del guasto non rivelato di mancata (errata) misura della temperatura VUU002. Vale quanto detto per VUT001 relativamente al PFH_{VUU002} = 1E-5 (1/h)

Dalla relazione (1) ne risulterà:

$\lambda^* = 2 \times (\lambda_{VUT001}) \times [\lambda_{VUU002} \times (TI/2 + MTTR)] + \lambda_{CCF}$ ffi 2E-2 (1/y), che corrisponde alla frequenza/anno di superamento della temperatura di progetto VP.

Se teniamo conto della variazione delle *altre* temperature di colonna conseguenti al disservizio (staratura oltre il 2%) del loop di controllo VUT001:

- VUT052 (385 °C)
- VUT012 (380 °C)
- VUU020 (355 °C)
- VUU016 (342 °C).

si avrà un ulteriore controllo protettivo per intervento dell'Operatore, almeno pari al 0,2 di probabilità di mancato intervento (più variabili) (IEC 615011-3).

Tuttavia ai fini della valutazione del consumo di vita nelle condizioni di superamento dei limiti di progetto, deve essere tenuto con conto che:

a) Il processo di invecchiamento del materiale al superamento della temperatura di inizio *creep* ha memoria [3]: la percentuale di vita persa a fronte di uno stesso profilo termico (e pressione) è cumulativa. Può essere, pertanto, utilizzato uno schema di guasto di tipo esponenziale per valutare la evoluzione del processo di guasto (failure rate o probabilità di guasto del sistema di controllo ad uno specifico istante τ^* dall'istante iniziale) ed in particolare un processo di Poisson con frequenza λ^* e k ripetizioni in un intervallo di tempo stabilito (tempo di missione). Si assume, quindi che ad ogni evento di disservizio del controllo on rivelato, si verifichi una condizione di upset ripetitiva i cui effetti si cumulano nella stima della perdita di vita in modalità che dipendono solo dal profilo del superamento delle soglie di progetto (o temperatura T° di inizio creep, [2]). L'evento di perdita di vita residua, quindi, è di tipo congiunto.
b) il profilo termico (T, P) e le condizioni di superamento dei limiti di progetto possono essere variabili. Ciò dipende dalle possibili modalità di evoluzione del processo che si possono verificare nelle condizioni anomale potenziali.

Pertanto, se indichiamo con λ^* la frequenza di superamento (non rivelato) delle condizioni nominali di progetto del materiale ad un determinato istante τ^* con riduzione $\Delta\rho^*$ della la vita utile VP (per il superamento delle condizioni nominali a partire dall'istante $\tau°$ di inizio esercizio controllato) risulterà che la probabilità di aver superato all'istante τ^* la vita VP è $p^* = pois(\lambda^*, N^*, \Delta\tau^*)$ che rappresenta la *probabilità in* $\Delta\tau^* = (\tau^* - \tau°)$ *di* N^* *eventi di superamento in quell'intervallo di tempo*. Quindi, se N^* è il numero *minimo* di superamenti delle condizioni di progetto del materiale ad un determinato istante τ^*, risulterà che la probabilità di aver superato la vita VP a τ^* è data semplicemente dalla probabilità p^* di N^* eventi in quell'intervallo di tempo $(\tau^* - \tau°)$ con frequenza λ^*.

Se questa probabilità p^* è inferiore alla soglia di accettabilità $p_{accett.}$, non si considera superata la vita utile del materiale all'istante τ^*; in altre parole si ha una ragionevole certezza di non aver superato in $\Delta\tau^*$ le condizioni di progetto dei materiali.

E' evidente che l'evento di perdita di vita residua di durata $\Delta\rho^*$ non rivelata è correlata alla indisponibilità del sistema di controllo (BPCS) o del mancato blocco o da eventi esterni. In altre parole nel caso di perdita del controllo della variabile significativa si deve verificare una condizione di up set con superamento della temperatura di progetto o inizio creep. Questa condizione può essere verificata apriori dalla studio HAZOP (o altri metodi). Se questa condizione non si verifica la perdita di controllo o di monitoraggio è ininfluente per la riduzione della vita residua non controllabile.

In Figura 13 sono riportati gli andamenti parametrizzati delle probabilità di superamento

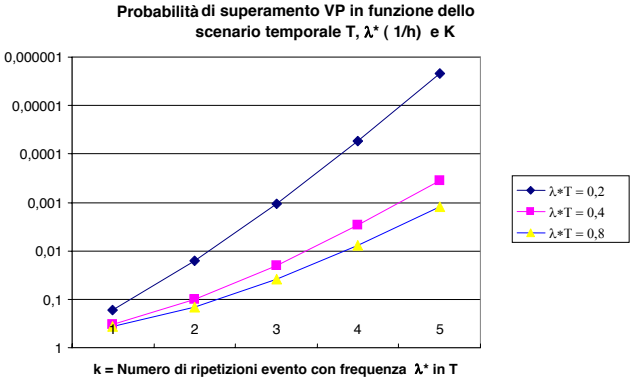


Figura 12 – Andamento della Probabilità di superamento VP in funzione della frequenza di supermento della Temperatura di inizio creep e del numero di superamenti nello scenario temporale T con frequenza $PFD_d = \lambda^*$.

della Vita utile in funzione della frequenza λ* di superamento della soglia di temperatura di inizio *creep* (altra assunta critica) per disservizio del sistema di misura/controllo a diversi scenari temporali T.

Assumendo, quindi, che λ* = 2E-2 (1/y) la stima della frequenza congiunta di superamento della soglia di criticità e del disservizio non rivelato del sistema di monitoraggio/controllo delle variabili VUUOO2 e VUT001, si otterrebbe , a fronte di una frequenza del Top Event (supermento della vita utile del materiale a partire da una condizione iniziale nota) pari a 10^{-4} (1/y) che se sono necessari solo 4 eventi di determinato profilo termico e durata per superare la vita utile, lo scenario temporale T sarebbe pari a circa 10 anni (Figura 12). Nel caso che olte al sistema di misura/ontorllo sia previsto anche un sistema di blocco automatico, la frequenza λ* sarebbe ridotta del fattore PFDavg = 1/RRF, con incremento di VU a parità di T e k.

10. RISULTATI DELL'APPLICAZIONE

Lo schema adottato per la stima della vita residua di materiali progettati a creep ed eserciti a caldo è basato su un approccio del rischio di superamento della vita di progetto VP dei materiali.

Al superamento della vita di progetto è associata una frequenza accettabile di accadimento, in base al livello delle conseguenze che si determinano se la vita di progetto è superata. La mancanza di informazioni affidabili nel periodo di superamento della soglia di progetto dei materiali può portare al superare la vita di Progetto (residua se si conosce lo stato di invecchiamento dei materiali ad un certo istante).

Dalla analisi delle misure di processo e dalla analisi di sicurezza Funzionale dei sistema di controllo automatica VUT001 e di misura VUU024 (§15), possono essere tratte le seguenti conclusioni:

a) solo alcune misure possono essere considerate nel campo dell'"accuracy": VUU002 e VUT001, quindi entro i limiti di precisione necessari per la misura ed il controllo. La variabile VUU0024 non può essere considerata nel campo dell'"accuracy" dato che non è ridondata e né sono condotte verifiche periodiche di taratura.
b) Le misure ridondanti (es: VUT001 e VUU002) possono assicurare una verifica della accuracy se monitorate in termini di misura differenziale.
c)Esiste una elevata correlazione tra la temperatura controllata dell'effluente forno e la temperatura di monitoraggio VUU024.
d) L'elevata correlazione (> 99%) tuttavia non esime da errori sistematici di off set fra le due temperature; per cui una staratura costante della VUU024 non è rivelabile attraverso una analisi di correlazione, se non nella fase transitoria.
e) Anche piccole variazioni di temperatura (30 °C – 50°C) di lunga durata in determinati campi di esercizio possono determinare effetti significativi sulla vita dei materiali in regime di creep; per cui anche la perdita della taratura dei convertitori mV/mA può essere significativa. Le perdite di taratura sono classificabili come "guasti" (errore > 2% del f.s.). Nel lungo periodo (1/1/2000 – 16/6/2008) è osservata una leggera perdita di taratura tra la VUU024 e VUT001 (Figura 10)
f) Ai sistemi di controllo automatici che realizzano il controllo VUT001 e quindi il profilo di temperature della Colonna non è associabile un SIL, dato che nel loop di controllo il controllore (Basic controller) non ha ridondanza.
g) Sono possibili disaccoppiamenti tra le misure controllate e quelle di colonna per cause legate alla colonna e non al controllo della temperatura dell'effluente forno. In ogni caso l'eventuale sovratemperatura transitoria è di breve durata.
h) I sistemi di regolazione automatica e di misura possono assicurare un livello sufficiente di affidabilità per il monitoraggio in funzione delle caratteristiche di invecchiamento dei materiali e delle modalità di supermento delle soglie critiche (creep , inzio creep)
i) I sistemi di blocco automatico/manuale possono contribuire sensibilmente alla riduzione della frequenza di superamento delle soglie critiche per un fattore dell'ordine di 100
j) E' necessario condurre una specifica analisi di rischio per l'apparecchiatura e valutare le conseguenze in caso di collasso dei materiali per superamento della vita di progetto a fronte di determinati Target di sicurezza.

k) Si deve valutare se:

- sono previste variabili di controllo dirette significative per il monitoraggio/controllo della temperatura dei materiali in oggetto;
- sono previste variabili correlate a quella significativa (in caso di perdita di questa);
- è possibile valutare il livello di correlazione e gli errori max. Gli errori max devono essere comparati con la precisione richiesta per la misura (accuracy);
- le misure sono ridondanti (accuracy);
- i tempi di ripristino di componenti guasti (MTTR);
- quali sono le cause di possibile sovratemperatura oltre il progetto o non è possibile superare mai la temperatura di progetto;
- nel caso di sovratemperature massime, quali sono i valori massimi raggiungibili e le durate;
- la mancanza del controllo della variabile di processo significativa di processo determina al contempo il superamento della temperatura di progetto dei materiali;
- esistono sistemi di blocco automatico/manuale in caso di superamento di temperature massime (progetto);
- Nella analisi condotta si può confermare che i sistemi suddetti relativi al controllo della variabile di processo VUT001 e misura VUU0024 rientrano nel range del SIL 1;
- L'accuracy è assicurata per la sola variabile VUT001 e non per la VUU0024 che costituisce la variabile di controllo dello stato del materiale (flash zone)
- È necessario adottare una procedura operativa e relativo livello di Responsabilità per le necessarie autorizzazioni alla manipolazione dei dati utili.

12. CONCLUSIONI

È presentato uno schema di acquisizione delle misure di processo (temperature) relative ai materiali costitutivi delle attrezzature a pressione basato su una "funzione di sicurezza" connessa con il rischio specifico di collasso di materiali in esercizio in condizioni di creep a caldo in un determinato scenario temporale. Si fa riferimento alla Norma IEC/CEI 61511, specifica per la valutazione della sicurezza funzionale dei sistemi strumentati di sicurezza per gli impianti di processo. Il sistema di acquisizione delle informazioni "certe", che tengono conto sia delle specifici requisiti di *accuracy, security* e di *sicurezza funzionale*, consente il monitoraggio delle variabili significative per la conduzione dell'Unità dell'Impianto in condizioni di sicurezza, a fronte di un obiettivo quantificato di rischio tollerabile. I dati di processo sono pertanto utilizzabili per una successiva valutazione, unitamente alle altre informazioni richieste dalla Circolare 48/2003, per la stima della vita residua. Lo schema è basato sulla ipotesi che l'andamento dei guasti dei sistemi di regolazione automatica e di acquisizione delle misure seguano una legge esponenziale; ipotesi che è normalmente verificata per questo tipo di sistemi. L'evoluzione del tempo medio al guasto è quindi descrivibile con un processo di Poisson omogeneo che fornisce la probabilità di riduzione r (3) della vita utile H* dell'attrezzatura a pressione in un determinato intervallo di esercizio τ in funzione del numero di eventi $\Delta\rho*$ (k) necessari per il raggiungimento di H*. La metodologia è applicabile a tutte le attrezzature a pressione le cui condizioni di esercizio sono monitorate da sistemi di misura e controllo di processo. La frequenza $\lambda_{\text{topevent}}$ soglia sarà quella che, in uno scenario temporale definito esclude credibilmente la possibilità del top Event la cui frequenza è stabilita dall'Utente.

Lo schema è applicabile anche, quale strumento predittivo, per nuove Unità di processo.

BIBLIOGRAFIA

1 IEC 61508, “Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety related Systems” - 2000 Edition

2 IEC/EN 61511 “Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety related Systems for the process Sector” - 2005 Edition

3 P. Lombardi, L. Cipolla, P.Folgarait, N. Bonora, L. Esposito – New time-independent formulation for creep damage in polycrystalline metals and its specialisation to high alloy steel for high-temperature applications – Material Science and Engineering A (2009), Elsevier

4 BREDA Report – prot. 05/07 - SARPOM

5 Data base relativo alle misure acquisite dal 2001 al 2009 (dati : FILES vps 1.xls, vps 2.xls, vps 3.xls)

6 Sistema di acquisizione e storicizzazione delle misure dal campo: UNIFORMANCE & POIS 2

7 ISPESL - Circolare 48/2003 “Procedura tecnica per le verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscose del materiale”

NOTE

[1] *Presidente SC CEI 65A, MT IEC 61508/61511*

sessione TEMATICA
ANALISI DEI RISCHI

Prove di scoppio su bombole GPL

F. Giacobbe - A. Polimeni* - P. Sergi* - M.A. Russo* - F. Olivo**
*S. Morelli***

** ISPESL Dipartimento di Messina*
*** ISPESL Dipartimento di Pescara*

1. SOMMARIO

La normativa vigente prevede, per i recipienti destinati al trasporto di gas compressi, liquefatti o disciolti, l'esecuzione di una revisione periodica che prevede un'ispezione visiva esterna ed una prova idraulica. I bidoni per GPL che superano positivamente tale verifica possono essere eserciti per ulteriori 10 anni, mentre i rimanenti vengono sottoposti a demolizione.

La sperimentazione relativa al presente lavoro è stata condotta sui recipienti che, per effetto delle difettosità riscontrate (es. vaiolature, ammaccature di notevole profondità, ripristino di saldature, ecc), vengono dismessi. Tali recipienti sono stati sottoposti a prova idraulica di scoppio al fine di individuare l'eventuale influenza delle difettosità, riscontrate in sede di revisione, nel meccanismo di collasso del bidone.

Per l'esecuzione delle prove è stato necessario predisporre un banco prova che permettesse di raggiungere valori di pressione fino a 120 bar (4 volte superiore al valore di pressione del test idraulico previsto nell'ambito della suddetta revisione periodica decennale).

Sono state sottoposte a prova i bidoni che presentavano le seguenti difettosità: vaiolature sul fasciame e/o fondo, ammaccature in corrispondenza e/o in prossimità dei cordoni di saldatura, evidenti incisioni determinate da interventi di sostituzione fondelli e/o collari.

Nel caso di fenomeni di corrosione o di smerigliatura lamiera sono stati effettuati preventivamente controlli spessimetrici ultrasonori, per quantificare il livello di assottigliamento dello spessore delle lamiere.

I dati ad oggi raccolti evidenziano che i difetti oggetto del presente studio non influenzano il meccanismo di scoppio del bidone. Le caratteristiche meccaniche della lamiera e la geometria del recipiente sono tali da ottenere sempre un'ampia deformazione in corrispondenza della virola ed una rottura in senso longitudinale.

2. COSTRUZIONE DEI BIDONI

I bidoni sono costruiti in acciaio P 265 NB(1) (vedi tabella 1) conformemente alla norma EN 10120 "Lamiere e nastri di acciaio per bombole saldate per Gas". Materiale similare è il Fe E 265 KR(2) (vedi tabella 1) già consentito ai sensi del Decreto 9 settembre 1998(3) per la costruzione dei bidoni gas e miscele di gas appartenenti alla classe 2 dell'ADR.

In figura 1 è schematizzata la più diffusa geometria costruttiva del bidone per gpl.

Esistono diversi modelli in funzione del peso di gpl contenuto all'interno; I modelli più diffusi sono: 10 kg, 15 kg e 25 kg. Al crescere della capacità aumenta conseguentemente lo spessore della lamiera utilizzata.



Figura 1 – Schematizzazione del bidone per gpl

Caratteristiche meccaniche										
Standard	**$\sigma_{snervamento}$ [N/mm²]**		**$\sigma_{rottura}$ [N/mm²]**		**Allungamento [%]**		**Resilienza a 0 °C [J]**			
P 265 NB	*265*		*410 ÷ 500*		*24 (spessore < 3mm)* *32 (spessore > 3mm)*		*27*			
Fe E 265 KR	*265*		*410 ÷ 530*		*23*		*27*			
Composizione chimica										
	C_{max}	**Mn**	**Si_{max}**	**Cr_{max}**	**Mo_{max}**	**Ni**	**Al**	**Nb**	**Ti_{max}**	**V_{max}**
P 265 NB	*0,19*	*0,40*	*0,25*				*0,02*	*0,05*	*0,03*	
Fe E 265 KR	*0,20*	*0,50* *1,30*	*0,35*	*0,25*	*0,08*	*0,30*	*0,02*	*0,01*	*0,03*	*0,02*

Tabella 1 – Caratteristiche meccaniche e composizione chimica del materiale P 265 NB e Fe E 265 KR

La normativa impone l'impiego di materiale ad alto limite elastico in modo da evitare in esercizio rotture di tipo fragile.

La lamiera sotto tensione (es. eccessiva pressione interna o forti urti) tende a plasticizzarsi in modo duttile senza compromettere la tenuta strutturale. In figura 3 si visualizzano gli effetti strutturali (determinati mediante calcolo FEM) connessi ad un eccesso di pressione interna.

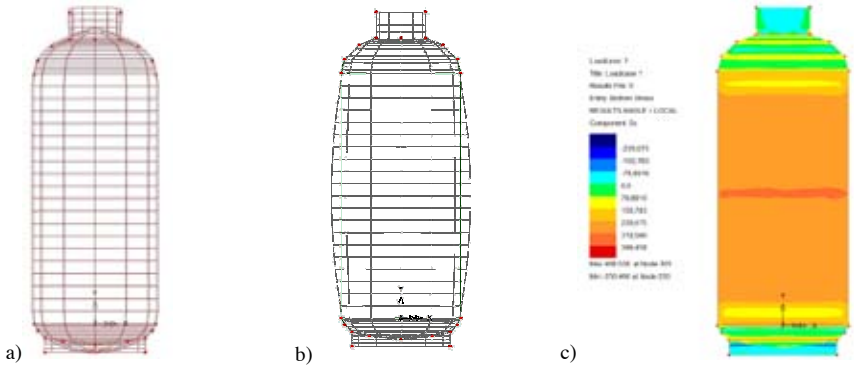


Figura 2 – Determinazione deformazione e sforzi mediante calcolo agli elementi finiti (FEM).
Caso a) geometria della mesh; caso b) andamento delle deformazioni; caso c) andamento delle tensioni

Di seguito si riporta il testo integrale del par. 7.2 norma UNI EN 1442(4) utilizzata in fase di progettazione e fabbricazione relativamente alla prova di scoppio:

7.2 Prova di scoppio sotto pressione idraulica

7.2.1 Condizioni di prova

7.2.1.1 Se si propone di apporre delle marcature (in conformità a 10(5)) sulla parte di recipiente soggetta a pressione, i recipienti da sottoporre a prova devono essere marcati allo stesso modo.

7.2.1.2 La prova di scoppio sotto pressione idraulica deve essere eseguita con apparecchiatura che consenta l'aumento graduale della pressione fino a che il recipiente scoppia. Si deve registrare la pressione alla quale avviene lo scoppio.

7.2.2 Interpretazione della prova

I criteri adottati per l'interpretazione della prova di scoppio sono i seguenti:

a) espansione volumetrica del recipiente; questa corrisponde a:

- il volume dell'acqua usata nel tempo intercorrente tra il momento in cui la pressione inizia ad aumentare e il momento in cui si verifica io scoppio, oppure

- la differenza tra il volume del recipiente all'inizio e alla fine della prova (vedere 7.2.3.2);

b) esame della frattura e della forma dei bordi (vedere 7.2.3.3).

7.2.3 Requisiti minimi di prova

7.2.3.1 Pressione di scoppio

La pressione di scoppio misurata Pb non deve in alcun caso essere minore di 9/4 della pressione di calcolo Pc e non minore di 50 bar.

7.2.3.2 Dilatazione volumetrica

Il rapporto della dilatazione volumetrica del recipiente rispetto al volume iniziale deve essere uguale o maggiore di:

20% se la lunghezza del recipiente (lunghezza del recipiente compreso il collo) è maggiore del diametro D;

17% se la lunghezza del recipiente (lunghezza del recipiente compreso il collo) è uguale o minore de! diametro D.

7.2.3.3 Tipo di frattura

a) La prova di scoppio non deve provocare alcuna frammentazione del recipiente.

b) La frattura principale non deve mostrare segni di fragilità, cioè i bordi della frattura non devono essere radiali ma devono presentarsi ad angolo rispetto ad un piano diametrale e mostrare una riduzione di area su tutto lo spessore.

c) La frattura non deve rivelare alcun difetto visibile del metallo, per es. sfogliatura.

Risulta da quanto sopra evidente l'attenzione che viene prestata sulla modalità di rottura del bidone e sulla necessità di non avere frammentazione della membratura. In figura 3 un esempio di bidone prima e dopo la prova di scoppio; evidente lo stato di deformazione plastica del fasciame.

a)  b) 

Figura 3 - prove di scoppio in fabbricazione

3. DESCRIZIONE DEL CAMPIONE

Oggetto del presente studio è la valutazione dell'incidenza delle difettosità riscontrate in sede di collaudo decennale sul processo di tenuta strutturale del bidone per gpl.

A tale scopo è stato selezionato un campione eterogeneo per fabbricante, per anni di esercizio e per tipologia di difetto (in tabella 2 sono riportati i singoli dati). I singoli bidoni sono stati catalogati con un numero progressivo.

La normativa in riferimento [2, 3] alle ammaccature prevede:

In linea di massima debbono essere considerate come deformazioni significative quelle che possano compromettere la stabilità del recipiente:

A. le ammaccature prossime al cordone di saldatura, intendendosi per tali quelle che abbiano il bordo a circa 5 cm di distanza dal cordone stesso;

B. le ammaccature di rilevante entità, in qualunque posizione esse si trovino, intendendosi per tali quelle che possono avare sensibile influenza sulla capacità del recipiente, in modo da alterarne il grado di riempimento, qualora esso contenga il previsto peso di gas;

C. le ammaccature che abbiano notevole profondità rispetto alla loro superficie e che presentino bordi a curvatura pronunziata od a spigolo vivo, in moda tale da far presumere che si siano formati cretti, o quanto meno, che l'incrudimento localizzato del materiale possa dar luogo a fenomeni di invecchiamento.

In figura 4 è possibile visualizzare alcune delle diverse tipologie di difetti.

Item	Anno	Marca	Difetto	Anni di esercizio
1	1965	OMIP	Ripresa saldatura circonferenziale superiore	45
2	1973	CM	Corrosione (vaiolature) su fondo	37
3	1980	MERLONI	Incisione sul fondo	30
4	1950	MERLONI	Ripresa saldatura circonferenziale superiore	60
5	1984	MERLONI	Ammaccatura sul fasciame	26
6	1968	COMESA	Corrosione (vaiolature) su fondo	42
7	1987	AM	Incisione sul fondo	23
8	1999	MERLONI	Ammaccatura sul fasciame + saldatura circonferenziale fasciame-calotta superiore	11
9	1999	AM	Ammaccatura sulla calotta superiore	11
10	1984	AM	Corrosione (vaiolature) su fondo	26
11	1986	MERLONI	Ammaccatura sulla saldatura incrocio saldatura longitudinale-circonferenziale fondo	24
12	1974	COMESA	Ammaccatura sulla saldatura longitudinale	36
13	1991	CM	Ammaccatura su saldatura incrocio fasciame-fondo	19
14	1998	MERLONI	Ripresa saldatura circonferenziale incrocio fasciame-fondo	12
15	1972	IC	Incisione sul fondo + asportazione di materiale	38

Tabella 2 – Descrizione del campione di bidoni utilizzati per la prova di scoppio



Figura 4 – Report fotografico. Tipologie di anomalie riscontrate sulle membrature

Da un precedente studio si rileva che in sede di collaudo decennale i bidoni che risultano non idonei si attesta intorno al 3%. Le tipologie di difetti si suddivide secondo le seguenti percentuali: corrosione esterna 82%, manomissioni 15 % e deformazioni 3%.

Su alcune bombole del campione in esame, in corrispondenza delle saldature (vedi figura 5), è stata rilevata la durezza in modo tale conoscere le differenze di incrudimento del materiale conseguenti sia al processo di saldatura che alla deformazione permanente.

	Durezza Brinell (HB)					
ID	**MB**	**ZTA**	**ZF**	**ZTA**	**MB**	**Note**
1	108 fasciame	106	138	134	125 fondo	Saldatura circonferenziale inferiore – zona non deformata
2	106 fasciame	111	154	156	146 fasciame	Saldatura longitudinale – zona deformata
3	158 fasciame	100	181	125	116 fondo	Saldatura circonferenziale inferiore – zona deformata
4	111 fasciame	111	120	116	109 fasciame	Saldatura longitudinale – zona non deformata
5	111 fasciame	111	124	100	106 fasciame	Saldatura longitudinale – zona ripresa saldatura
6	106 fasciame	112	159	111	127 fondo	Saldatura circonferenziale inferiore – zona ripresa saldatura

Tabella 3 – Valori di durezza in MB, ZTA e ZF



Figura 5 – Rilievo delle durezze. Particolari dei punti di controllo

Dall'esame dell'esito delle durezze è possibile estrapolare le seguenti considerazioni:

- Il materiale base (MB) integro assume mediamente il valore di 110 HB sul fasciame e 125 HB sul fondo;
- La zona fusa (ZF) presenta durezze variabili tra 120 HB e 181 HB in funzione del livello di deformazione subito dal giunto.

4. ESECUZIONE PROVE DI SCOPPIO

Come precedentemente esaminato la normativa di riferimento utilizzata in sede di costruzione prevede tra l'altro esecuzione di prove di scoppio sotto prova idraulica al fine di garantire l'assenza di segni di fragilità dovuti sia al materiale che al processo di costruzione.

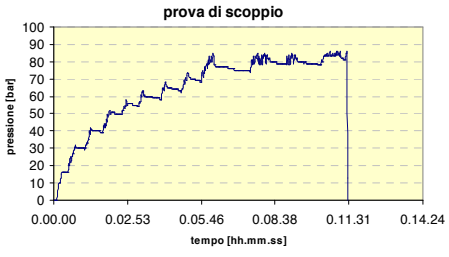
Con il presente lavoro si simula la suddetta prova al fine di verificare il mantenimento delle caratteristiche di duttilità anche dopo anni di esercizio e dopo aver subito alterazioni tali da non renderli più idonei in sede di collaudo decennale.

Per la conduzione delle prove sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

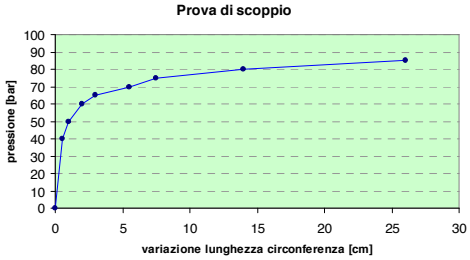
- Pompa idraulica a comando manuale (fondo scala 120 bar);
- Manometro digitale tarato SIT dotato di datalog (fondo scala della sonda 160 bar)
- Termometro digitale tarato SIT
- Personal computer portatile per l'acquisizione dei dati

La temperatura nel periodo delle prove è rimasta costante (31 °C) e dunque non ha influenzato l'esito. Ai fini di condurre le prove in sicurezza è stata circoscritta l'area nelle adiacenze del bidone per una distanza di 10m.

In figura 6a) è rappresentato il grafico dell'andamento della pressione all'interno del bidone (rampa di carico). Si evidenzia come per valori di pressione superiori ai 70 bar l'aumento della pressione richiede tempi maggiori a causa dell'amplificarsi della deformazione plastica (vedi figura 6b).



a)



b)

Figura 6 – Grafici relativi alla prova di scoppio. Caso a) andamento della pressione in funzione del tempo; Caso b) andamento della pressione in funzione della variazione della circonferenza

In figura 7 vengono visualizzate le crescenti deformazioni all'aumentare della pressione. Risulta chiaramente visibile il rigonfiamento subito dalla virola centrale. A pressioni superiori ai 70 bar si nota anche il rigonfiamento delle calotte.



Figura 7 – Deformazione del bidone a crescere della pressione.

Esaminando il materiale in corrispondenza della fessura è possibile notare, a livello macroscopico, il caratteristico aspetto fibroso delle superfici a seguito della frattura duttile (vedi figura 8c).



Figura 8 – Scoppio del bidone; caso a) momento dello scoppio; caso b e c) particolare della fessurazione

5. CONCLUSIONI

La sperimentazione della prova di scoppio su un campione di 15 bidoni di gpl, oggetto di scarto in sede di verifica decennale, ha dimostrato il permanere delle caratteristiche di plasticità e duttilità delle lamiere anche dopo diversi anni di esercizio (risulta influente anche il fattore fatica dovuto alle fasi di carico e scarico del bidone), sollecitazioni esterne sulle lamiere e/o sulle saldature e processo di corrosione esterna.

Esaminando i risultati finali evidenziamo che la rottura si manifestata sempre sopra i 50 bar e con una variazione del volume superiore al 20%; tali valori continuano ad essere in linea con i requisiti della norma UNI EN 1442 anche con gli effetti negativi connessi all'esercizio.

6. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano le aziende "Ultragas C.M. S.p.A." stabilimento di Giammoro (ME), "Antonio Merloni Cylinders & Tanks S.r.l." stabilimento di Matelica (MC), "Edipower S.p.A." C.T.E. di San Filippo del Mela (ME), "Sicilservice CND S.r.l." di Milazzo (ME) e "S.M.A.I. S.a.s." officina di Milazzo (ME), per la disponibilità prestata durante le fasi della sperimentazione del presente lavoro.

BIBLIOGRAFIA

[1] UNI EN 10120 “Lamiere e nastri di acciaio per bombole saldate per Gas”, 2008

[2] D.M. 12 settembre 1925, “revisione delle bottiglie e dei bidoni per GPL – modalità di attuazione”

[3] 55a Serie di N.I. al regolamento approvato con D.M. 12 settembre 1925

[4] F. Giacobbe, A. Polimeni, M. Russo, F. Olivo “Esperienze maturate nell’ambito della revisione delle bombole saldate contenenti GPL”, Atti convegno Safap 2008

[5] Kurz W., Mercier J.P., Zimbelli G.: “Introduzione alla scienza dei materiali”, Hoepli, 2006

[6] UNI EN 1440, “Recipienti portatili e ricaricabili di acciaio saldato per gas di petrolio liquefatto (GPL). Riqualificazione periodica”, 2008

[7] UNI EN 1442, “Recipienti portatili e ricaricabili di acciaio saldato per gas di petrolio liquefatto (GPL) - Progettazione e costruzione”, 2008

[8] UNI EN 1803, “Bombole trasportabili per gas - Ispezione periodica e prove per bombole per gas di acciaio al carbonio saldato, 2004

[9] UNI EN 13322-1, “Bombole trasportabili per gas - Bombole ricaricabili per gas di acciaio saldate - Progettazione e costruzione - Parte 1: Acciaio al carbonio”, 2004

NOTE

(1) P 265 NB – trattasi di Acciai non legati di qualità impiegati per produzione di bombole saldate per gas. normativa EN 10120

(2) Fe E 265 KR – trattasi di laminati a caldo ad alto limite elastico. Normativa UNI: Fe E 27 KR; Normativa AFNOR Bs 2

(3) DECRETO 9 settembre 1998. Elenco dei gas e delle miscele di gas appartenenti alla classe 2 dell’ADR, non elencati nominativamente, classificati sotto le rubriche collettive “Non altrimenti specificate - N.a.s.”.

(4) UNI EN 1442 “Recipienti portatili e ricaricabili di acciaio saldato per gas di petrolio liquefatto (GPL) - Progettazione e costruzione”

(5) ciascun recipiente deve essere marcato in modo permanente e leggibile

sessione TEMATICA
ANALISI DEI RISCHI

Pressure Equipment Risk Analysis Learning from Accident

G. Mulé - G. Mulè**
**Libero professionista*

Ancora oggi accadono incidenti mortali dovuti a studi insufficienti di RISK ASSESSMENT e a controlli inadeguati .

Le insufficienze derivano anche dal ritardo con cui si prende atto della inadeguatezza di norme metodi e procedure superate ma che di fatto continuano ad essere applicate.

Con la relazione proposta gli autori intendono mostrare quanto sia perentoria l'esigenza di aggiornamento del processo di studio dei pericoli stima e valutazione dei rischi connessi con attrezzature segregate o segregabili adeguandolo all'approccio della RISK ASSESSMENT e quanto sia improrogabile la disapplicazione delle discipline, norme tecniche e procedure vigenti prima della introduzione della disciplina di derivazione europea. Gli incidenti presi in considerazione sono

1 - L'incidente in uno sterilizzatore per flaconi di soluzioni fisiologiche
2 - L'incidente sul reattore chimico di Seveso
3 - L'incidente ad una macchina per il trattamento di ossigeno terapia.

1. L'INCIDENTE DELLO STERILIZZATORE

L'incidente si è verificato in uno "sterilizzatore" di flaconi di soluzione fisiologica di acqua e sodio cloruro con un contenuto di 2,5 gr. di sale per 250 ml di soluzione. (Fig.1) Durante la fase di estrazione e scarico dall'autoclave, quattromila flaconi da 250 ml di soluzione si sono rotti determinando una esplosione fisica, la diffusione di vapore acqueo e acqua a temperatura elevata, la proiezione di un numero elevatissimo di schegge di vetro che hanno investito le persone impegnate nelle operazioni di scarico. Il fenomeno si è verificato perché l'acqua contenuta nei flaconi, all'atto della rottura, si trovava a temperatura superiore alla temperatura di ebollizione a pressione atmosferica. Parte dell'energia accumulata dal liquido, in esubero rispetto a quella necessaria per portare l'acqua a temperatura di ebollizione a pressione atmosferica, ha determinato il passaggio di stato di parte del liquido. Il fenomeno è stato esaltato dalla superficie dei 4000 flaconi di vetro e dalla presenza di sali e ioni in soluzione. La formazione di vapore e la conseguente forza di espansione ha determinato una sovrappressione che, propagandosi violentemente, ha investito quanto incontrato e lanciato, a guisa di proiettili, le schegge di vetro. A questa energia si è aggiunta quella che si è sviluppata per la espansione repentina della miscela di aria e vapore saturo contenuta entro i flaconi nella parte non occupata dalla fase liquida. La rottura dei flaconi si è determinata per il verificarsi di una o più concause collegate alle modalità con cui si realizzava lo scarico dei flaconi posti su quattro carrelli che, manovrati manualmente, scorrevano su binari che presentavano delle discontinuità. La sterilizzazione dei flaconi , necessaria per distruggere le spore gangrene o vari tipi di tetano eventualmente presenti nella soluzione si effettua a120-130 C°. Nel caso in argomento lo sterilizzatore, costruito

per una pressione massima relativa di 3,5 bar e una temperatura di 148 °C, era alimentato con vapore prodotto da generatore alla pressione di 12 bar (e temperatura di 187 °C) ridotta, prima dell'avviamento allo sterilizzatore, a 4,5 bar. La valvola di riduzione risultava protetta da valvola di sicurezza tarata a 4,9 bar non seguita da raccoglitore - separatore di condensa. Il vapore a valle del riduttore avrebbe potuto, quindi, essere anche surriscaldato. Comunque supponendo che il vapore fosse saturo la massima temperatura ipotizzabile, in ingresso allo sterilizzatore, era di 152 °C . Oltre alla rete vapore lo sterilizzatore era collegato alla rete di aria compressa, agli scarichi delle condense e all'atmosfera per le operazioni di sfiato. Lo sterilizzatore era corredato con i seguenti dispositivi di controllo, regolazione e protezione:

- 2 manometri tipo Bourdon scala 1-5 bar che riportavano la pressione in camera di sterilizzazione
- 3 sonde a termoresistenza per il rilevamento della temperatura in camera di sterilizzazione con lettura digitale sul display del quadro di comando.
- Pressostato di interblocco che impediva l'immissione di vapore in camera a porta non perfettamente chiusa;
- Valvola di sicurezza con scarico in atmosfera c;
- Dispositivo che impediva l'apertura della porta quando all'interno la pressione era superiore alla pressione atmosferica.

Le fasi del ciclo erano controllate da un computer programmato per funzionare, nel caso di sterilizzazione di flaconi, con i parametri e le successioni di seguito indicate:

1.Accensione del computer
2.Introduzione dei carrelli
3.Chiusura delle porte
4.Selezione del ciclo di lavoro con l'introduzione dei valori fissati per i seguenti parametri: Temperatura sterilizzazione; Scostamento di temperatura consentito ; Pressione di sterilizzazione automaticamente ricavata dal computer ; Scostamento massimo ammesso per la pressione; Tempo di riscaldamento inteso come tempo necessario per uniformare la temperatura entro la camera e entro i flaconi; Tempo di sterilizzazione; Temperatura di apertura della valvola di immissione di acqua nel serpentino di raffreddamento aria introdotta per raffreddare la camera
4.Raffreddamento
5.Scarico della pressione
6.Apertura camera
7. Scarico dei flaconi

La fase di raffreddamento si concludeva quando le temperature rilevate dalle tre sonde registravano tutte la temperatura definita nel programma del ciclo.

Solo quando la fase di raffreddamento si era conclusa il sistema di controllo consentiva di passare alla fase di scarico della pressione in camera.

Conclusa la fase di raffreddamento la pressione era riportata a valori molto vicini alla pressione atmosferica aprendo la valvola di scarico che consentiva di eliminare i residui di acqua e aria.

Quando la pressione aveva raggiunto la pressione atmosferica il ciclo era considerato concluso.

Le fasi previste dal fabbricante e inserite nel programma del computer non potevano essere variate senza alterare e manomettere il programma.

Conclusioni

A seguito degli accertamenti è risultato evidente che:

1. nel ciclo attuato veniva regolarmente saltata la fase di raffreddamento.
2. Nel ciclo si era raggiunta una temperatura superiore alla temperatura usuale di sterilizzazione;
3. L'operazione di scarico era iniziata ad una pressione interna alla camera pari a quella atmosferica ma ad una temperatura non definita.
4. I flaconi sono stati sottoposti ad uno shock termico superiore a quello indicato nella scheda;
5. Al momento della rottura i flaconi erano sottoposti, al loro interno, alla pressione dovuta alla somma delle pressioni parziali del vapor saturo alla temperatura a cui si trovavano i

flaconi e dell'aria compressa per effetto della temperatura. Tale pressione era di molto superiore alla pressione alla quale erano normalmente sottoposti e molto vicina alla pressione indicata come pressione di prova nella scheda di fornitura;

6. Le operazioni di scarico dei flaconi venivano effettuati con carrelli manovrati manualmente. Su ogni carrello erano caricati sette vassoi sovrapposti sui quali erano poggiati i flaconi. Sul vassoio più basso erano applicate delle rotelle che rotolavano sulle guide applicate al piano di carico e scarico e dentro lo sterilizzatore La movimentazione di carica e scarico dei carrelli nello sterilizzatore, era solo manuale. Era possibile, come mostrato nel corso degli accertamenti, che si determinassero degli scostamenti tra le guide del carrello e quelle dello sterilizzatore. Le guide dello sterilizzatore mostravano numerose deformazioni. Le operazioni di scarico dei ripiani di carrelli avveniva agendo sul vassoio dotato di ruote con un'asta metallica. Secondo le testimonianze durante le operazioni di scarico i flaconi a volte oscillavano;
7. Il pericolo di esplosione per rottura dei contenitori sottoposti alle sollecitazioni prima indicate per effetto dello scarico di essi dallo sterilizzatore prima di averli raffreddati fino a temperatura adeguata risulta o non preso in considerazione o volutamente ignorato;
8. Nel passato erano già successi incidenti dello stesso tipo sia in Italia che all'estero di cui non si era tenuto alcun conto;
9. Dalla documentazione acquisita è risultato che l'apparecchiatura era stata sottoposta anche a tutte le verifiche di esercizio e periodiche previste dalla normativa specifica per i recipienti destinati ad essere eserciti a pressione, nella quale lo sterilizzatore rientrava;
10. Secondo la prassi tali verifiche facevano e fanno riferimento, solo al pericolo rappresentato dalla apertura dello sterilizzatore con pressione interna ancora superiore a quella atmosferica;
11. La norma tecnica italiana non obbligava ancora alla applicazione di dispositivi che impedissero l'apertura dello sterilizzatore prima che la temperatura fosse portata a valori inferiori a quella di ebollizione come invece previsto da altre normative europee.
12. Una semplice RISK ANALYSIS avrebbe certamente consentito di individuare il pericolo.



Figura 1 - Il carrello con i flaconi

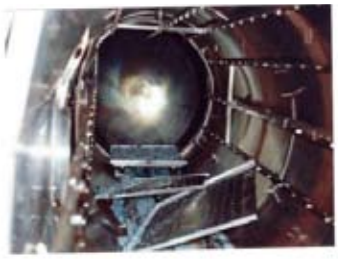


Figura 2 - sterilizzatore dopo l'incidente

2. L'INCIDENTE DI SEVESO

Il 10 luglio del 1976, dal capannone di una società chimica con sede a Meda, il disco di rottura installato su un reattore chimico cedette lasciando fuoriuscire una nube di vapore che raggiunse l'altezza di 40 m e inquinò 270 ettari di terreno. L'incidente che portò alla ribalta il prodotto più tossico mai fabbricato nella storia dell'industria è certamente uno degli incidenti più studiato in riferimento alla cinetica chimica della reazione. Qui ce ne occuperemo solo per mettere in evidenza gli aspetti impiantistici in funzione dello scopo della memoria.

Nell'impianto nel quale avvenne l'incidente si produceva il triclorofenolo, T.C.F., per idrolisi dell'1, 2, 4, 5, - tetraclorobenzolo (T.C.B.) con NaOH, a pressione atmosferica e in presenza di glicole etilenico.

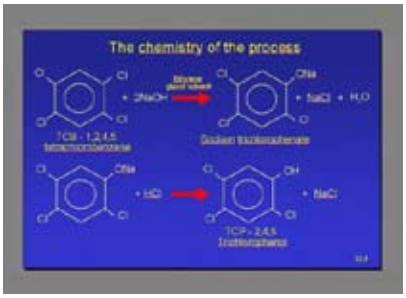


Figura 3 - La reazione

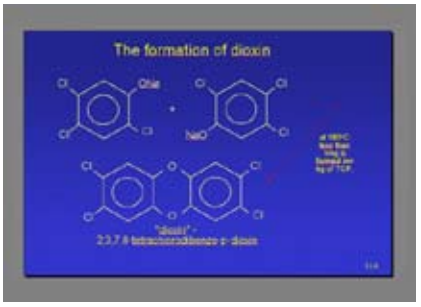


Figura 4 - La formazione di diossina

Le operazioni che si devono compiere per arrivare al triclorofenolo, secondo le reazioni indicate, sono essenzialmente quattro.

1) *idrolisi alcalina* del T.C.B. in fase liquida in presenza di glicole etilenico a 140 e 170 °C. alla fine della quale si ritrovavano 2, 4, 5 triclorofenato di sodio, glicole etilenico e dietilenico, cloruro di sodio, la soda residua e xilene;
2) diluizione con acqua e acidificazione del triclorofenato sodico con acidi
3) purificazione del T.C.F. grezzo mediante distillazione sotto vuoto.

La reazione di idrolisi, moderatamente esotermica, se non adeguatamente controllata, può portare la temperatura del sistema ad un valore oltre il quale i prodotti di reazione si decompongono violentemente. Inoltre, le materie prime che prendono parte alla reazione, i prodotti intermedi che si formano, i prodotti finiti e i sottoprodotti che sono presenti in questo procedimento, presentano caratteristiche di pericolosità per la loro infiammabilità , per la loro tossicità e per la possibilità di dar luogo a reazioni esplosive.

Tra i sottoprodotti in particolare, anche se la sua formazione è solo in misura di parti per milione, va segnalata la *tetracloroparadibenzodiossina* (T.C.D.D.), che accompagna sempre la produzione di T.C.F., secondo la reazione riportata in fig. 4.

L'incidente è avvenuto dopo che la reazione d'idrolisi era stata ultimata e dopo che erano stati allontanati lo xilene e circa il 15% di glicole, per distillazione. Al termine di queste operazioni, il riscaldamento era stato sospeso e dopo 15 minuti l'agitazione fermata. L'ultima temperatura misurata nel reattore fu di 158 °C.

Lo stato delle conoscenze.

Si sapeva che:

- **La temperatura della reazione è cruciale. se non è mantenuta attentamente a 160 °C il prodotto intermedio può condensare con sé stesso formando T.C.D.D."**
- **I fenoli policlorurati sono instabili alle temperature di 190 °C.**

La struttura dell'impianto

L'impianto funzionava a cicli discontinui ed era suddiviso in due sezioni.

1) La sezione di reazione e acidificazione;
2) La sezione di distillazione, infustaggio e scagliatura.

Nel reattore di idrolisi, munito di agitatore si compivano le seguenti fasi: il caricamento dei reagenti, la reazione propriamente detta, la distillazione dello xilolo, la distillazione del glicole, la distillazione della massa grezza con acqua. Il reattore aveva una capacità di 13 m3 , era riscaldato e raffreddato con serpentino esterno, era collaudato per 3 ate e 200 °C per il corpo interno; 12 ate e 200 °C nel serpentino.

Il reattore era collegato sia al circuito sfiati, che serviva a riportare a pressione atmosferica le apparecchiature, dopo le operazioni sotto vuoto, ad evitare sovrappressioni durante la distillazione a pressione atmosferica e durante i riempimenti degli apparecchi sia al circuito del vuoto, come pure al circuito aria compressa per i travasi; era, infine, collegabile con i vari circuiti dei diversi fluidi di processo.

Il sistema di caricamento non era meccanizzato né automatizzato.

Per la parte che interessa il reattore, il circuito aveva origine dal barilotto di riflusso dei liquidi condensati.

Il barilotto, di limitate dimensioni, era privo di controllo di livello, e un eventuale suo riempimento avrebbe potuto provocare una chiusura idraulica che avrebbe potuto ostacolare lo sfiato, se la valvola di scarico del barilotto, o quella di riflusso al reattore, fossero state lasciate chiuse o fossero rimaste ostruite. Il vapore giungeva al reattore sotto forma di vapore surriscaldato, provenendo direttamente dalla centrale, dove si produceva a 440 °C e 45 ate, dopo riduzione, per semplice laminazione senza desurriscaldamento, a 12 ate. E' stato ritenuto comunque, successivamente, che il vapore arrivasse al reattore a temperatura di 330 °C – 300 °C.

Il reattore era corredato con:

- un contatore volumetrico sulla linea di caricamento dell'etilenglicole
- un manometro sul vapore a 12 ate
- un mano vuotometro
- un registratore di temperatura collegato ad una termocoppia
- un disco di rottura tarato a 3,8 ate.

Per intervenire sul circuito vapore di riscaldamento e/o acqua di raffreddamento si doveva agire manualmente su una valvola di intercetto.



Fig 5 - Lo schema del reattore

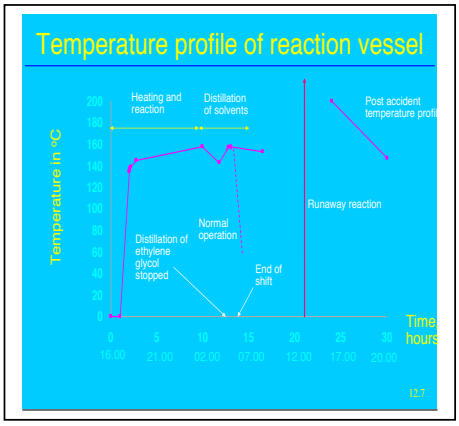


Fig: 6 - L'andamento della temperatura

Fu accertato che nel reattore si erano verificate reazioni di elevata esotermicità che avevano provocato una decomposizione spinta delle sostanze organiche e un aumento di pressione oltre i limiti di resistenza del disco stesso.

I consulenti di parte sostennero che la miscela contenuta nel reattore di Seveso non poteva essere interessata da reazioni esotermiche fino alla temperatura di 225-230 °C. Pertanto, poiché detta miscela, al momento della sospensione, si trovava alla temperatura di 158 °C e, poiché con il sistema di riscaldamento con vapore saturo a 12 ate e 191 °C non sembrava possibile che, all'istante della sospensione, la temperatura della parete interna del reattore a contatto con il liquido potesse superare i 180 °C, non risultava spiegabile l'evento, alla stregua delle conoscenze dell'epoca.

Prove successive effettuate con l'ARC hanno confermato l'insorgere di un primo picco esotermico a 180 °C; lo sviluppo di calore associato a questo effetto (122 J/g) è sufficiente a far salire di circa 60 °C la temperatura in condizioni adiabatiche e a innescare una seconda più violenta reazione di decomposizione.

Le prove ARC hanno anche mostrato che la miscela oltre 180 °C era in grado di autoriscaldarsi in condizioni adiabatiche, fino a 230-250 °C in un tempo sorprendentemente vicino al tempo reale dell'incidente di Seveso.

Il Tribunale di prima istanza, quindi, ritenne ampiamente dimostrato che: lo stato delle conoscenze, all'atto della progettazione dell'impianto, alla data della decisione di riprendere la produzione, all'atto dell'incidente, era tale da consentire di:

- sapere che nell'idrolisi alcalina del T.B.C. potessero verificarsi reazioni di decomposizione incontrollabili con contaminazione del contenuto del reattore;
- che tali reazioni potessero avere inizio anche a temperature comprese tra i 165 e i 180 °C;
- che sopra i 190 °C i policlorofenoli potessero dar luogo a reazioni esplosive;
- che gli incidenti pregressi avevano mostrato l'esigenza di dotare gli impianti di diversi sistemi di controllo estremamente automatizzati.

A prescindere dalla probabilità della formazione di diossina, il collegio ritenne indiscutibile che la pericolosità della lavorazione in esame fosse da collegare allo sviluppo di eventuali reazioni esotermiche che avrebbero determinato la formazione di rilevanti quantitativi di diossina. Il collegio ritenne, quindi, che: "**molte fossero le cautele da adottare e non adottate** per prevenire l'incidente e che ad aggravare la situazione di insicurezza abbia contribuito tutta una serie di manchevolezze accessorie, in particolare:

- la strumentazione ed i sistemi di controllo delle pressioni, delle temperature, dell'acidità e simili erano molto limitati, e ciò perché era decisamente insufficiente il numero dei parametri controllati, e mancava, inoltre, ogni sistema automatico di allarme e di intervento per la sicurezza;
- la rilevazione della temperatura in un unico punto era assolutamente insufficiente e, comunque, non era collegato ad alcuno strumento di controllo;
- il collegamento del reattore all'atmosfera che costituiva, nelle condizioni operative adottate a Meda, l'unico fattore di sicurezza, era da considerarsi come non inserito in un sistema organico di prevenzione, perché avrebbe dovuto essere a flusso convogliato ad adeguate apparecchiature di abbattimento;
- la realizzazione dell'impianto di Meda, considerato degli stessi responsabili impianto pilota, era inadeguato alla elevata pericolosità del procedimento, soprattutto in considerazione delle carenze dal punto di vista della strumentazione, dei sistemi di allarme e dei dispositivi di sicurezza.
- non esistevano disposizioni precise e scritte circa la modalità di esercizio, oltre quella che riguardava la carica dei prodotti, il prelievo dei campioni e lo scarico dei residui; che le istruzioni importanti di processo venivano impartite solo per via orale e in modo generico.

Il collegio ritenne altresì che, invece:

1. Si doveva provvedere all'installazione dei necessari automatismi di allarme, di controllo e di intervento ritenuti di "rilevante diffusione nel mondo industriale anche con riferimento a produzioni certamente più tranquille di quelle dell'ICMESA".
2. Nel caso di specie, infatti, detti strumenti potevano essere installati in modo tale da far intervenire elementi di blocco o di allarme per il personale nel caso di raggiungimento di una temperatura limite considerata pericolosa".
3. In particolare ben avrebbe potuto essere previsto un automatismo che consentisse di bloccare l'immissione del vapore o che facesse entrare in funzione automaticamente il sistema di raffreddamento attraverso l'introduzione di acqua nell'apposito serpentino o, al limite, nella massa di reazione".
4. Si doveva provvedere ad installare un impianto di abbattimento perché necessario e perché realizzabile.
5. Viste le condizioni di progettazione e collaudo del reattore e del serpentino (12 ate e 200 °C), si doveva provvedere ad eliminare le condizioni di surriscaldamento in cui il vapore giungeva al reattore, a temperatura variabili, non controllata e non rilevata da strumenti, ma calcolabile tra i 300 e 330 °C.
6. I dischi di rottura possono essere preferiti (si suppone alle valvole di sicurezza), quando si abbiano fluidi di grande valore o di grande tossicità, quando perdite di qualsiasi entità devono essere evitate. In questo caso "si richiede" l'uso di un secondo serbatoio per il recupero del fluido scaricato.

Considerazioni

1) Il reattore era stato escluso dalla sorveglianza dell'ente preposto in considerazione dell'art. 73 del D.M. 1974. In sostanza perché destinato a essere esercito a pressione inferiore a 0,5 bar;

2) In realtà era prevista, in una certa fase della lavorazione, l'immissione di aria a pressione superiore alla pressione atmosferica e, quindi, la dichiarazione di esercizio non a pressione risultava, comunque, non corretta;
3) Era possibile e quindi doveva essere preventivato che il vapore potesse non pervenire saturo, e quindi a temperatura inferiore a 200 °C, ma surriscaldato a temperatura valutata tra i 300 e 330 °C;
4) Nessuno si pose il problema di sapere perché su un reattore destinato a funzionare a pressione atmosferica fosse installato un disco di rottura; cosa, invece, ampiamente rilevata e stigmatizzata dai periti e dal collegio del giudizio di prima istanza;
5) Il circuito degli sfiati era intercettabile mediante valvola ed era suscettibile di dar luogo a condensazioni di liquidi e accumulo degli stessi fino a provocare ostruzioni che, impedendo il libero sfiato, potevano causare sovrappressioni, vanificando la funzione del circuito stesso e sollecitando il disco di rottura;
6) Avrebbe dovuto essere del tutto evidente che, in un reattore contenente fluido in doppia fase, occorre individuare, come pressione massima ammissibile, la pressione corrispondente alla tensione di vapore del liquido alla temperatura massima ammissibile, così come correttamente riportato in modo esplicito nella direttiva PED.

3. INCIDENTE ENTRO UNA CAMERA IPERBARICA MULTIPOSTO

L'incidente si è verificato in una camera iperbarica entro la quale si sviluppò un incendio nel quale persero la vita 11 persone. Una camera iperbarica multiposto è un recipiente in pressione nel quale sono introdotti pazienti da sottoporre a ossigenoterapia per inalazione di ossigeno puro in pressione mediante l'utilizzo di maschere oro-nasali (erogatori a domanda) o mediante caschi a mandata continua. L'ossigeno deve essere fornito a pressione e livello di purezza opportuni. I principali pericoli legati all'utilizzo di camere iperbariche sono due: a) la possibile depressurizzazione rapida della camera iperbarica; b) il pericolo di incendio. Il pericolo di incendio è da valutare con estrema attenzione perché si potrebbe sviluppare in atmosfere arricchite di ossigeno e in pressione. In queste condizioni le proprietà di molti materiali cambiano, l'energia necessaria per l'ignizione si abbassa, la rapidità della combustione cresce in modo elevato.



Fig.7 - L'interno di una camera iperbarica gemella di quella dell'incidente.

Rispetto al pericolo di incendio vanno adottati provvedimenti di:

PREVENZIONE

Informazione ai pazienti
Formazione degli operatori
Controlli in ingresso
Misurazioni della percentuale in volume di ossigeno
Regolazione del livello di ossigeno
Presenza di operatore all'interno
Collegamento con l'esterno
Controlli sull'impianto di illuminazione
Controlli sull'impianto elettrico

PROTEZIONE

Impianto di spegnimento dotato di:
Manichette orientabili poste agli estremi della camera e azionabili dall'interno;
Impianto a pioggia attivabile dall'interno e dall'esterno

Gli Accertamenti dei consulenti

L'analisi del sistema di rilevazione della concentrazione di ossigeno all'interno della camera iperbarica, unitamente alle modifiche "artigianali" apportate ai collari in lattice ed alla errata arbitraria regolazione della soglia di intervento della cella ossimetrica 27%, ha consentito di concludere che:

1. Al momento dell'incidente (circa 10min - 15min dall'inizio della distribuzione dell'ossigeno), all'interno della camera iperbarica la concentrazione in volume dell'ossigeno non poteva superare il valore del 27,5%, ma più verosimilmente era contenuta entro il 24%.
2. Il fatto che la soglia della sonda ossimetrica fosse stata regolata al valore del 27% ha fatto arguire che il superamento della soglia di concentrazione del 23,5%, considerata "sicura" fosse frequente e tollerato;
3. Un così rilevante flusso disperso di ossigeno è stato spiegato con l'uso di un elevato numero di caschi, oltretutto modificati ,che ha avvalorato l'ipotesi che, nello spazio tra la cute dei pazienti e gli abiti e negli abiti stessi, la concentrazione di ossigeno aveva potuto raggiungere valori anche molto elevati (60% - 80%), abbassando quindi enormemente l'energia richiesta per ottenere l'ignizione degli abiti stessi e giustificando una rapida propagazione della fiamma ai vestiti ed alla cute del paziente una volta avuta adeguata ignizione.

Per quanto riguarda l'impianto antincendio fu accertato che

1. La portata dell'impianto antincendio seppure inferiore a quello indicato dal codice 99 della NFPA, è stato ritenuto sufficiente a garantire una azione efficace dell'impianto antincendio.
2. Il numero, la posizione, le caratteristiche degli sprinkler e degli altri elementi dell'impianto avrebbero consentito di raggiungere portate superiori installando un diverso modello di sprinkler e posizionando diversamente l'autoclave rispetto alla camera iperbarica, in modo da eliminare metri di tubazione inutile e un numero elevato di curve.
3. Le prove effettuate dal collegio dei consulenti del P.M. avevano dimostrato che, anche in condizioni più severe di quelle ipotizzate come condizioni di innesco nel caso di specie, l'intervento del getto d'acqua con la doccia si era rivelato assolutamente efficace per spegnere il focolaio di incendio e che lo spegnimento con l'intervento degli sprinkler si realizza in tempi molto rapidi e con consumi di acqua molto ridotti.
4. L'impianto antincendio al momento dell'incidente non era funzionante, in quanto:
   I) mancava acqua nel serbatoio;
   II) la saracinesca del tubo di mandata posta in prossimità del serbatoio era chiusa;
   III) il rubinetto della bombola di aria compressa propellente era chiuso.
5. Sebbene il serbatoio dell'acqua fosse predisposto per l'applicazione del tubo per il controllo di livello, questo non era installato e le prese relative erano tappate.
6. All'interno della camera iperbarica non era disponibile la doccetta attivabile manualmente, che avrebbe potuto consentire lo spegnimento tempestivo di un focolaio d'innesco.
7. Il personale sanitario addetto alle camere iperbariche sottovalutava il pericolo di incendio all'interno della camera iperbarica, tanto da non curarsi dell'efficienza dell'impianto antincendio.
8. Il personale addetto alla manutenzione non aveva alcuna famigliarità con l'impianto antincendio in questione ed evidentemente non ne ha mai curato la manutenzione.
9. Tutte le cause dell'inefficienza dell'impianto antincendio avrebbero potuto essere rilevate "a vista", senza l'uso di strumenti di misura; porre rimedio alle situazioni anomale non avrebbe richiesto alcuna operazione più complessa dell'aprire una saracinesca o collegare la doccetta o la lancia a mano all'attacco relativo, operazioni eseguibili certamente da un qualunque idraulico.
10. La valutazione dei rischi era assolutamente insufficiente con particolare riferimento al ri-

schio di incendio nelle camere iperbariche, del tutto sottovalutato e in quanto insufficiente fu giudicata come non fatta;

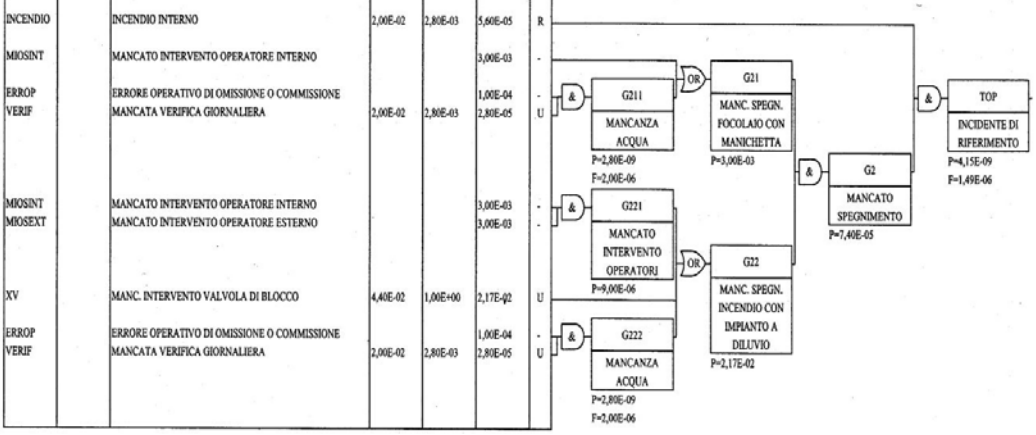
11. Si accertò che erano state adottate misure di prevenzione e protezione inidonee secondo i parametri della fattibilità tecnologica del momento;
12. Si era omesso di impartire, personalmente o per il tramite del personale medico, tecnico o infermieristico o per mezzo di adeguati cartelli informativi, le dovute istruzioni ai pazienti, inoltre mancavano i controlli per assicurare che le prescrizioni venissero rispettate;
13. Si era trascurata la necessaria formazione del personale tecnico ed infermieristico sul funzionamento dei sistemi antinfortunistici ed in particolare sull'utilizzo del sistema antincendio.
14. In conclusione il minuto di sopravvivenza minima stimato con i calcoli riportati in perizia avrebbe consentito l'attivazione dell'impianto antincendio, che, considerando le potenzialità dell'impianto stesso avrebbe significativamente dilatato i tempi di sopravvivenza rimuovendo calore e spegnendo almeno parzialmente l'incendio.

Si ritenne pertanto che l'intervento tempestivo dell'impianto antincendio avrebbe certamente influito sulla durata ed intensità dell'incendio in questione e che conseguentemente almeno alcuni degli occupanti della camera iperbarica avrebbero potuto essere salvati.

La camera iperbarica non aveva subito le verifiche previste dalla legge. Fu accertata l'assoluta inadeguatezza dell'analisi dei rischi condotta dalla società e fu mostrato che, una RISK ANALYSIS, corretta e semplice, avrebbe evidenziato quanto le misure di prevenzione e protezione prima ricordate erano essenziali per garantire un adeguato livello di prevenzione e protezione.

L'albero dei guasti riportato in perizia mostrò infatti che se correttamente applicati quei provvedimenti avrebbero reso estremamente improbabile l'incidente.

EVENT NAME	DATA REF	DESCRIPTION	FAILURE RATE	Trep/ Ttest	PROB	R/U
INCENDIO		INCENDIO INTERNO	2,00E-02	2,80E-03	5,60E-05	R
MIOSINT		MANCATO INTERVENTO OPERATORE INTERNO			3,00E-03	-
ERROP		ERRORE OPERATIVO DI OMISSIONE O COMMISSIONE			1,00E-04	-
VERIF		MANCATA VERIFICA GIORNALIERA	2,00E-02	2,80E-03	2,80E-05	U
MIOSINT		MANCATO INTERVENTO OPERATORE INTERNO			3,00E-03	-
MIOSEXT		MANCATO INTERVENTO OPERATORE ESTERNO			3,00E-03	-
XV		MANC. INTERVENTO VALVOLA DI BLOCCO	4,40E-02	1,00E+00	2,17E-02	U
ERROP		ERRORE OPERATIVO DI OMISSIONE O COMMISSIONE			1,00E-04	-
VERIF		MANCATA VERIFICA GIORNALIERA	2,00E-02	2,80E-03	2,80E-05	U



BIBLIOGRAFIA

- Le perizie e la bibliografia ad esse allegate.
- Articolo su Tecnologie chimiche 1/94 e bibliografia allegata
- G. Mulè - "SEVESO 17 anni dopo - Gli aspetti impiantistici, normativi e processuali del caso Seveso nello studio presentato al corso Politecnico di Milano - ISPESL sull'analisi dei rischi nell'industria di processo" - Tecnologie chimiche n. 1/94

sessione TEMATICA
ANALISI DEI RISCHI

PDM 293/01 e DLgs 238/05: controllo di incidenti rilevanti nei porti industriali, petroliferi e commerciali. Un esempio applicativo: il porto petrolifero di Gela

G. Argento - V. Nastasi**
**Dipartimento ISPESL di Palermo*

1. PREMESSA

I nostri porti sono oggi caratterizzati da una promiscuità di tipologie di traffico: industriale, petrolifero, e commerciale; e se a questo aggiungiamo che le infrastrutture portuali che li ospitano sono spesso inadeguate poiché derivanti da continui adattamenti di porti esistenti, e che i porti risultano spesso posti in adiacenza ad aree urbane di densità abitativa elevata, si intuisce facilmente come l'obiettivo della sicurezza nelle aree portuali deve oggi rappresentare una'esigenza prioritaria per tutte le attività connesse al normale esercizio e deve essere posta alla base di qualsiasi concreta ipotesi di sviluppo.

Come è noto con il D.M. 16 maggio 2001, n. 293, emanato dal Ministero dell'Ambiente di concerto con il Ministero della Salute è stato acquisito il regolamento di attuazione del comma 3) dell'art. 4 del D.Lgs. 334/99, in materia di controllo dei pericoli d'incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose per i porti industriali e petroliferi. Il successivo Decreto Legislativo n. 238 del 21 settembre 2005, ha poi esteso l'applicazione della normativa in questione anche ai "porti commerciali".

Attraverso questi decreti è ribadito che per garantire l'obiettivo della sicurezza nelle aree portuali è necessario verificare se risulta garantita la consistenza e l'adeguatezza, ai fini della sicurezza, delle aree portuali dedicate alla movimentazione ed alla sosta delle merci pericolose e non che in queste aree giungono sia sfuse che in colli, ed attraverso diversi mezzi di trasporto.

Occorre, pertanto, porre attenzione non soltanto alla movimentazione e deposito dei prodotti petroliferi ma anche agli altri prodotti e merci pericolosi, e non, che si movimentano nelle aree portuali.

Tale decreto ha di fatto obbligato tutti i soggetti interessati ad individuare precise modalità applicative per il rispetto della normativa La sicurezza dipende da una attenta programmazione delle operazioni di gestione delle attività, basata su criteri oggettivi di misura e controllo in modo da evitare quei livelli di rischio che ora non potranno definirsi accettabili.

2. LE FREQUENZE INCIDENTALI NELLE REALTÀ PORTUALI

Per stimare le frequenze incidentali, in assenza di statistiche significative riferite alle specifiche realtà portuali, si attinge a banche dati internazionali MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service), che raccoglie a partire dal 1980 i rapporti di eventi incidentali, che coinvolgono sostanze pericolose.

Dalla ricerca, si può evidenziare nel periodo 1990 -1999, una media di 59 incidenti registrati per anno, legati al trasporto marittimo . Da un primo esame si può fare una distinzione in base alla causa che hanno generato tali incidenti . Le più frequenti risultano:

- Esplosioni / incendi (37%);
- Sversamenti accidentali (23%)
- Arenamenti, collisioni, urti con strutture fisse e affondamenti (40 %)

Da tale esame, si evidenzia che c'è una netta prevalenza di incidenti che causano Esplosioni/ Incendi e Sversamenti accidentali (60%) non associati ad un preliminare incidente nel contesto della navigazione .

Da ciò, l'importanza dei fattori intrinseci relative al trasporto di sostanze pericolose, non connessi con la navigazione. Inoltre del rimanente 40% di incidenti che provocano , arenamenti, collisioni, urti con strutture fisse e affondamenti , circa il 50% di essi provocano successivamente incendi/esplosioni e sversamenti .

Infine oltre a considerare i rischi intrinseci legati al ciclo produttivo di un porto rientrante nel campo della direttiva "Seveso 3", occorre prendere in considerazione i rischi di origine criminosa, esogena ed endogena, quali sabotaggio, l'incendio doloso e l'attentato che possono causare danni assai gravi in termini di vite umane, patrimoniali e ambientali .

Infatti, occorre evidenziare, l'esigenza sempre più recente ma drammaticamente attuale di prevenire il rischio proveniente da atti ostili o terroristici nei porti (SECURITY) .

Tale aspetto è stato affrontato ultimamente nel nostro paese con il D.Lgs. 6 novembre 2007 n° 203 " Attuazione della direttiva 2005/65/CE relativa al miglioramento della sicurezza dei porti". Tale normativa ha come finalità l'elaborazione del Piano di sicurezza del porto che integra i piani di sicurezza elaborati a norma del precedente Regolamento (CE) n° 724/2004, al fine di offrire maggiore protezione a persone, impianti e equipaggiamenti.

2.1 Inquadramento Normativo

Il D.lgs 238/05, di modifica del D.Lgs 334/99 all'art. 4 comma 3, prevede che la normativa degli impianti a rischio di incidente rilevante si applichi ai porti industriali, petroliferi e commerciali.

Ma la necessità della valutazione della sicurezza del porto e la redazione di un rapporto sulla sicurezza dell'ambito portuale non è di per se una novità. Infatti tale adempimento rientrava tra quelli ai fini degli adempimenti previsti decreto del Presidente della Repubblica 17 maggio 1988, n. 175, sui rischi di incidenti rilevanti connessi con determinate attività industriali e, anche, in quelli del decreto del Ministro dell'ambiente 20 maggio 1991, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 126 del 31 maggio 1991."

Come è noto nel DPR n. 175 si parla di ambito di applicazione del decreto in impianti industriali dove l'uso o la movimentazione o il deposito di sostanze pericolose possa presentare rischi di incidente rilevante.

Invece nel DM 20 maggio 1991 veniva imposto uno studio sulle attività che prevedevano emissioni in atmosfera al fine di garantire la salute dell'uomo e dell'ambiente

Ma la Legislazione Italiana ha mostrato una successiva attenzione verso le attività portuali con la successiva emanazione della legge 18 gennaio 1994 n. 84, Riordino della legislazione in materia portuale.

Viene con tale legge rafforzata la necessità di effettuare uno studio sui rischi da incidente rilevante Infatti all'art. 5 al comma 5 è detto che "Al piano regolatore portuale dei porti aventi le funzioni di cui all'articolo 4, comma 3, lettera b), e alle relative varianti, è allegato un rapporto sulla sicurezza dell'ambito portuale.

Quindi sebbene già il D.Lgs. 17 agosto 1999 n. 334 all'art. 4 comma 3 aveva previsto la individuazione dei rischi e la valutazione della sicurezza nei porti industriali e petroliferi,.la vera novità, parlando ovviamente dell' ambito portuale, è introdotta con il D.Lgs. 238/05, (il recepimento italiano della direttiva Seveso 3), quella di voler estendere il campo di applicazione, includendo, oltre ai porti industriali e petroliferi, anche i porti commerciali e quelli ove vi sia un'autorizzazione a detenere e movimentare sostanze pericolose di cui all'Allegato I del D.Lgs.334/99.

Sebbene la realtà portuale sia una realtà particolare per la stessa dovranno pertanto valere anche quelle disposizioni legislative relative alla sicurezza proprie delle realtà industriali.

Ma gli adempimenti che erano stati previsti nel 175 e nel successivo D.Lgs. 334/99 di redigere questo rapporto di sicurezza erano indirizzati in ultima analisi principalmente a redigere quel Piano di emergenza esterno e pertanto avevano come fine quello di ottenere e garantire la sicurezza delle persone presenti nelle potenziali aree di danno che potevano determinate a seguito l'accadere di incidenti rilevanti.

Invece il rapporto di sicurezza previsto dalla legge 84/1994 aveva un primario scopo ossia quello dell'utilizzo del territorio, che ovviamente ricadeva nell'ambito portuale, ed in particolare

delle aree di danno determinata dall'accadere degli incidenti rilevanti.

Se analizziamo questi due aspetti ossia la sicurezza delle persone presenti in ambito portuale ed razionale utilizzo del territorio ricadente nelle arre di danno si può ben dire come entrambi gli aspetti risultano ora ben definiti amalgamati con il DM 293/2001, specifico per la realtà portuale con la redazione del rapporto integrato di scurezza portuale Il Rapporto Integrato di Sicurezza Portuale, previsto dal D.M. 293/01, che rappresenta l'anello di congiunzione tra la normativa in tema di riordino della legislazione portuale (Legge 18 gennaio 1994 n. 84) e quella sui rischi di incidenti rilevanti (Decreto Legislativo 17 agosto 1999 n. 334) presenta diverse peculiarità.

Dal D. Lgs. 334/99 e smi e dalla Legge 84/94, nasce quindi il DM 293/2001 " Regolamento interministeriale (M. Ambiente, M.Trasporti e della Navigazione, M. della Sanità), specifico per la realtà portuale (SAFETY).

Il DM 293/2001 disciplina le modalità di redazione del:

- Rapporto Integrato di Sicurezza portuale (RIS), che deve essere complementare ai singoli rapporti di sicurezza delle Aziende presenti, estendendo l'indagine a tutti i settori operativi dell' " Azienda Porto";
- Piano di Emergenza Portuale;
- Sistema di Controllo (verifiche ispettive almeno ogni 2 anni);

Restano immutati gli obblighi per i gestori di cui al D.Lgs. 334/99 come modificato dal D.Lgs. 238/05 (Seveso 3) .

La redazione del Rapporto Integrato di Sicurezza Portuale previsto dal D.M. 293/01, è quindi un obligo ben definito e ben distinto dai rapporti e studi di sicurezza redatti dalle singole aziende presenti in area portuale soggette agli adempimenti di cui agli artt. 5, 6 ed 8 del D.Lgs.334/99 (redazione dei quali le aziende stesse non sono esonerate).

Se da una parte le finalità principali del D.M. 293/2001 sono quelle della verifica della compatibilità di un'area industriale al contempo si ottiene un valido strumento per poter creare un Piano regolatore portuale e tutto ciò in linea a quanto previsto dalla L. 84/94

Utilizzando questa nuova metodologia di analisi ossia effettuando l'analisi di rischio d'area si ottiene la verifica di compatibilità territoriale. Occorre valutare tutta l'area portuale e vederla ora come una area dove gravitano diverse aziende ben distinte tra loro, ma come una unica "azienda porto" ed estendendo l'indagine a tutti i suoi settori operativi.

Occorre quindi procedere preliminarmente alla valutazione del rischio e verificarne quindi la compatibilità del territorio.

3. RAPPORTO INTEGRATO DI SICUREZZA PORTUALE

Gli elementi essenziali del Rapporto integrato di sicurezza portuale ai sensi del DM 293/01 da prendere in considerazione sono:

A) **Inquadramento territoriale**: descrizione del territorio e l'uso dell'area portuale e della zona di interesse;
B) **Individuazione e quantificazione degli eventi incidentali**: analisi storica (internazionale e del porto in questione) degli incidenti a terra ed in prossimità del porto;
C) **Valutazione del rischio e della compatibilità territoriale**: metodologie per individuare il rischio d'area e la compatibilità territoriale attraverso.
D) **Elementi essenziali per la redazione del Piano di Emergenza portuale** (art. 6 DM 293/01): le misure per controllare e circoscrivere gli incidenti in modo da minimizzare gli effetti e limitare i danni per l'uomo, per l'ambiente e le cose.

I punti A), B) e D) di cui sopra, hanno ricadute specifiche per ogni porto che si deve prendere in considerazione e si possono affrontare in modo semplicemente descrittivo . Il punto C) " Valutazione del rischio e della compatibilità territoriale" rappresenta il cuore del Rapporto Integrato di Sicurezza Portuale da cui discendono tutte le scelte in materia di prevenzione e/o protezione dei rischi di incidenti rilevanti.

3.1. Security dei porti

Per raggiungere il miglior grado di difesa degli insediamenti industriali ed in particolare di quelli a rischio di incidente rilevante, occorre adottare sistemi di security (barriere concentriche

meccanoelettroniche) e sistemi di safety (sicurezza intrinseca, passiva ed attiva) integrati allo scopo di rendere l'installazione resistente ad atti ostili esterni e/o interni e ridurre al minimo le conseguenze in caso di attuazione degli stessi con pronte ed efficaci azioni di risposta.

Con la pubblicazione del decreto legislativo 6 novembre 2007, n. 203, è stata recepita nell'ordinamento italiano la direttiva 2005/65/CE, relativa al miglioramento della sicurezza nei porti. Con questo atto il legislatore ha reso operative le disposizioni studiate a livello europeo per completare le misure di sicurezza dettate con il regolamento n. 725/2004/CE, concernente il miglioramento della sicurezza delle navi e degli impianti portuali. Di fatto, si tratta di un importante provvedimento avente forza di legge che, unitamente al regolamento 725/2004/CE, mira a garantire alti livelli di sicurezza in tutta la catena del trasporto marittimo e a conseguire il massimo grado possibile di protezione per le industrie marittime e portuali.

Il nuovo provvedimento ha istituito la **conferenza di servizi per la sicurezza portuale** (art. 5). Pertanto, al fine di adottare la valutazione di sicurezza del porto (art. 6) e il piano di sicurezza dello stesso (art. 8), presso ciascun Compartimento marittimo si deve riunire la conferenza di servizi per la sicurezza portuale, alla quale è affidato anche l'incarico di fornire una consulenza pratica sull'implementazione delle misure di sicurezza per i porti di giurisdizione. Questa conferenza è presieduta dal capo del Compartimento marittimo .

L'Autorità portuale per i porti di competenza o l'Autorità marittima negli altri porti deve provvedere a elaborare una valutazione di sicurezza per ciascun porto di giurisdizione, tenendo conto delle specificità delle diverse zone, delle aree adiacenti, se hanno un impatto sulla sicurezza del porto, nonché delle valutazioni effettuate per gli impianti portuali individuati ai sensi del regolamento n. 725/2004/ CE, e, per l'adozione, deve sottoporla alla Conferenza di servizi per la sicurezza portuale .

In funzione delle conclusioni della valutazione di sicurezza del porto, l'Autorità di sicurezza elabora il **piano di sicurezza del porto**. Il piano di sicurezza prende in debita considerazione le specificità delle diverse zone di un porto ed integra i piani di sicurezza degli impianti portuali elaborati a norma del regolamento (CE) n. 725/2004.

I piani di sicurezza dei porti individuano, per ciascun livello di sicurezza:

a) le procedure da seguire;
b) le misure da attuare;
c) le azioni da intraprendere.

Quanto evidenziato in questo paragrafo (security dei porti) deve essere messo in relazione con la prima parte della presente memoria che affronta sostanzialmente problemi di safety . Solo una sicurezza integrata safety–security può affrontare con efficacia la complessità dei rischi presenti nei porti .

Con circolare "SECURITY" n 20 del 6 dicembre 2007, il Comando Generale del Corpo delle Capitanerie di porto ha impartito alcune istruzioni per l'applicazione del D.Lgs. 203/2007 al fine di dare fluidità e snellezza alla normativa in questione, nell'interesse di una maggiore sicurezza marittima e dei porti.

4. APPLICAZIONE DEL DM 293/01 AL PORTO PETROLIFERO DI GELA

La Raffineria di Gela confina a Nord con la SS 115 nel tratto Gela -Vittoria e con la ferrovia Gela-Siracusa, ad Est con terreni agricoli, a Sud con il demanio marittimo e ad Ovest col il fiume Gela ed ha una superficie di oltre 5 milioni di metri quadri , con una viabilità interna di 26 Km .

Riceve ogni anno oltre 5 milioni di tonnellate di materia prima di cui oltre il 20% è costituita da grezzi locali, che viene trasformata in prodotti finiti da vendere sul mercato.

La Raffineria di Gela che ha un grado di conversione tra i più alti d'Europa ossia una capacità di trasformare il greggio in prodotti petroliferi pregiati fino all'80% (benzina, GPL, gasoli), limitando al minimo i prodotti residuo a basso valore commerciale: olio combustibile e pet-coke.

La raffineria dispone di circa 1,2 milioni di m3 di stoccaggio, di cui 0,4 per le materie prime, distribuiti su oltre 120 serbatoi e sfere; ed è strutturata per movimentare le materie prime e la maggior parte dei prodotti via mare attraverso:

- Il pontile che si addentra sul mare per 2800 metri e negli ultimi 200 sono attrezzati da 2 a 4 navi aventi stazza da 100 a 41000 tonnellate
- Pontiletto che è derivato dal pontile con una struttura che si protende per 280 metri ha

due punti di ormeggio per navi fino a 10000 tonnellate di stazza

- La diga foranea con sviluppo ad arco di 1200 metri e con 6 ormeggi per attracco navi da 1000 ad 85000 tonnellate)
- Il campo boe che è un sistema di scarico realizzato al fine di ricevere navi sino a 85.000 DWT Il campo boe è costituito da un gruppo boe di ormeggio e segnalazione, un gruppo di manichette di collegamento alla nave e da una struttura di supporto denominata PLEM (che in sintesi è una struttura in ferro adagiata al fondo marino in corrispondenza del punto di ormeggio).

Ma in seguito alla mareggiata del 26 dicembre 2004, la diga foranea è stata resa inagibile limitando pertanto l'operabilità della raffineria alla disponibilità di 2 soli attracchi in testata pontile e un collegamento provvisorio con il campo boe.

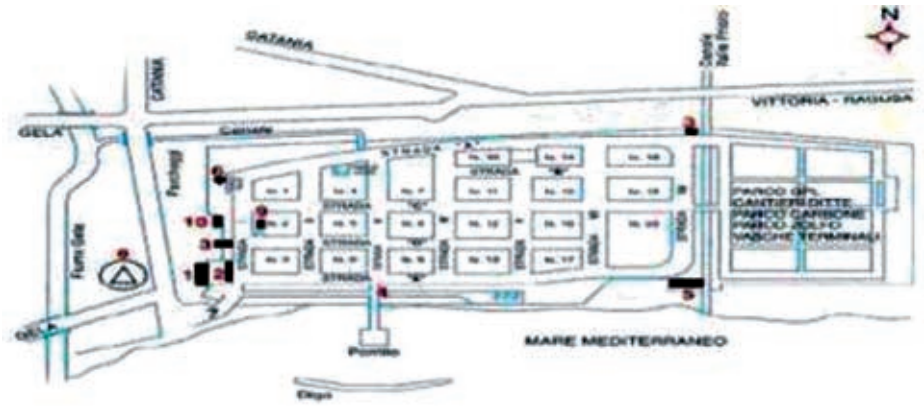


Figura 1 : Rappresentazione schematica dell'insieme della Raffineria di Gela con il relativo porto

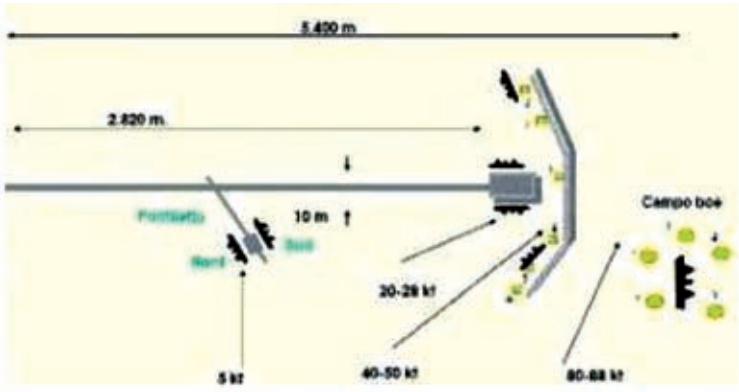


Figura 2 : Rappresentazione del porto petrolifero di Gela

4.1. Rapporto integrato di sicurezza del porto petrolifero di Gela

Nel 2007 è stato presentato il rapporto integrato di sicurezza del porto petrolifero di Gela in riferimento all'art. 4 del DM 293/2001 , con particolare riferimento alla Diga Foranea, al Pontile, al Pontiletto e al Campo boe .

La movimentazione dei prodotti petroliferi avviene a mezzo bracci di carico (pantografi) e/o manichette di interconnessione flessibili per Diga Foranea, Pontiletto e Campo Boe, mentre per la movimentazione di coke e derivati si utilizza apposito nastro trasportatore e mezzi di sollevamento per il pontile .

Come già detto l'indisponibilità operativa della diga foranea, conseguentemente alla eccezionale mareggiata del 2004, non consente ancora il ricevimento delle materie prime e la

spedizione dei prodotti finiti da diga . Al fine di scongiurare la fermata del ciclo produttivo e dei servizi ausiliari, in attesa della definizione e della successiva realizzazione dei lavori di ripristino della diga, sono stati individuati e realizzati interventi al fine di permettere la ricezione delle materie prime e la spedizione dei prodotti dal pontile.

Gli interventi sono consistiti:

- adattamento degli accosti già operativi del pontiletto, previa realizzazione degli stacchi valvolati su linee esistenti, per movimentare anche navi GPL e virgin naphtha;
- adattamento degli accosti della testata del pontile, previa realizzazione di stacchi valvolati su linee esistenti, finalizzato alla movimentazione di prodotti petroliferi.
- installazione di attrezzature di sicurezza sulla testata del pontile, al fine di proteggere le operazioni di cui sopra.
- Procedure operative

In considerazione delle modifiche effettuate a seguito della mareggiata del dicembre 2004, si evidenzia nel rapporto integrato presentato all'analisi della Conferenza dei Servizi che nell'ambito del sistema "Diga foranea-Pontile-Pontiletto" gli scenari incidentali possibili sono rimasti gli stessi, ciò che è cambiato è l'origine degli scenari incidentali che prima, nell'assetto "originario", erano previsti in diga foranea e che adesso nell'assetto "temporaneo modificato attuale"sono presso il pontile e il pontiletto. In funzione di ciò si è provveduto a dotare il Pontile e il Pontiletto con sistemi di prevenzione/protezione equivalenti a quelli esistenti presso la diga foranea.

4.2. Analisi di rischio

È stata condotta un'analisi finalizzata alla individuazione di tutti quegli eventi (guasti, anomalie di processo, eventi esterni, ecc.) che potrebbero portare agli eventi incidentali quali: incendi, esplosioni, rilasci di sostanze tossiche e/o infiammabili in fase liquida o gassos.

Considerata la semplicità degli impianti in esame e delle operazioni svolte presso tali impianti, si è proceduto alla identificazione delle possibili cause incidentali mediante una analisi basata su:

Esperienza storica

Esperienza tecnico professionale di impianto

4.3. Ipotesi incidentali

La Raffineria di Gela ha condotto lo studio relativo alle ipotesi incidentali distinguendo i diversi assetti presenti, Infatti è stato distinto l'assetto originario relativo alla diga distinto dall'assetto temporaneo attuale relativo a pontile e pontiletto, cosi come vengono distinte le ipotesi incidentali relative al campo boe nell'assetto originario ed in quello attuale

Di seguito vengono evidenziate le ipotesi incidentali più importanti e che sono presenti nei due distinti assetti:

Ipotesi incidentale n° 1: sovrariempimento della nave cisterna con conseguente tracimazione e spandimento dei prodotti neri (oli combustibili, gasoli) sulla copertura e in mare. Se questa ipotesi si verificasse il mare circostante verrebbe inquinato da prodotti neri;

Ipotesi incidentale n° 2: sovrariempimento della nave cisterna con conseguente tracimazione e spandimento dei prodotti bianchi (virgin-nafta, benzine, e simili) sulla copertura ed in mare. Se questa ipotesi si verificasse il mare circostante verrebbe inquinato, con elevato rischio di incendio, dovuto all'alta volatilità dei prodotti;

Ipotesi incidentale n° 3: sovrariempimento della nave cisterna con conseguente tracimazione e spandimento di prodotti petroliferi con incendio . Se questa ipotesi si verificasse si avrebbe un incendio a bordo della nave e sullo specchio di mare antistante l'ormeggio ;

Ipotesi incidentale n° 4: Perdita di prodotti petroliferi in fase di carico/scarico da tubazione per perdite di guarnizioni e/o cedimento di una saldatura. Se questa ipotesi si verificasse il mare circostante verrebbe inquinato, con elevato rischio di incendio, dovuto all'alta volatilità dei prodotti (soprattutto in presenza di prodotti bianchi e di greggio);

Ipotesi incidentale n° 5: Perdita di prodotti petroliferi dal sea line interessato al carico scarico di prodotti petroliferi in nave cisterna . In caso di rottura manichetta o per rottura della guarnizione del braccio di carico.

Se questa ipotesi si verificasse ci sarebbe inquinamento del tratto di mare tra pontile e diga con elevato rischio di incendi in presenza di prodotti bianchi o di greggio;

Ipotesi incidentale n° 6: Perdita di GPL in fase liquida da manichetta e/o da braccio di carico . Ciò si può verificare per cedimento della manichetta o della guarnizione del braccio di carico o per anomali movimenti durante le fasi di carico Se questa ipotesi si verificasse ci sarebbe un rilascio di GPL in atmosfera, con vaporizzazione del prodotto e la formazione di una nube esplosiva;

Ipotesi incidentale n° 7: Perdita di GPL liquido o gas da sea line Ciò si verifica per cedimento di uuna saldatura o per rottura di guarnizione di accoppiamenti flangiati Se questa ipotesi si verificasse ci sarebbe un rilascio di GPL prima in acqua e poi in atmosfera, con vaporizzazione del prodotto e la formazione di una nube esplosiva;

Ipotesi incidentale n° 8: Collisione della nave con la diga o il pontile o il pontiletto o il campo boe . Ciò si verifica in fase di attracco della nave, quando essa urta violentemente con la struttura della banchina o un'altra nave in fase di trasferimento di prodotto . Se questa ipotesi si verificasse, il mare circostante potrebbe essere inquinato, con elevato rischio di incendio, dovuto all'alta volatilità dei prodotti;

Ipotesi incidentale n° 9: Collisione tra navi nel campo boe. Ciò si verifica per errore umano o avaria tecnica. Se questa ipotesi si verificasse, il mare circostante potrebbe essere inquinato, con elevato rischio di incendio;

Ipotesi incidentale n° 10: Perdita di stream benzolitico. Ciò si verifica per cedimento meccanico di una saldatura o per rottura guarnizione di accoppiamento flangiato della linea di carico. Se questa ipotesi si verificasse, il mare circostante potrebbe essere inquinato, con elevato rischio di incendio.

4.4. Probabilità di accadimento

Il calcolo delle frequenze incidentali attese è stato effettuato utilizzando i dati dell'esperienza incidentale storica applicandola ai volumi di traffico navale registrati a Gela .

I dati storici sono i seguenti:

- Impatti o collisioni con pontile, non necessariamente con danno alle tanche :0,0022 occasioni/visita;
- Rilascio o perdita di prodotto : 0,00018 occasioni / travaso ;
- Probabilità di innesco, dato un rilascio: 0,036 .

Da quanto sopra ed in relazione ai quantitativi movimentati e all'entità del traffico navale di Gela sono stati riportati per ciascuna sostanza la relativa probabilità di accadimento degli scenari incidentali rilevanti di cui al paragrafo precedente.

4.5. Tipologia scenari incidentali

Ai fini del calcolo delle conseguenze incidentali si è fatto riferimento ai due prodotti più pericolosi : la benzina ed il GPL.

TOP 1 → Perdita di benzina

Dato un rilascio di 60 mc/h (cioè 1/10 della portata massima di carico/scarico) per la durata di 10 minuti (tempo necessario alla fermata delle pompe ed intercettazione della linea), si formerebbe una pozza di diametro 15 m, da cui evaporerebbe circa 15 Kg/min di vapori di benzina .

L'incendio istantaneo ipotizzato comporterebbe valori di irraggiamento come sotto indicato:

- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 12,5 KW/mq: 24 m > elevata letalità per l'uomo
- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 7 KW/mq: 31 m > inizio letalità ;
- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 5 KW/mq : 34 m > lesioni irreversibili .;
- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 3 KW/mq: 38 m > lesioni reversibili;

Tale scenario incidentale che in assetto operativo originario è riferito alla Diga nell'assetto temporaneo è riferito nello studio alla testata pontile ed al pontiletto.

Descrizione evento Primario	Frequenza accadimento evento Primario(acc/anno)	Scenario incidentale conseguente	Frequenza accadimento Scenaio (acc/anno)	Elevata Letalità	Inizio Letalità	Lesioni Irreversibili	Lesioni reversibili
Perdita di benzina	3.74E-02	Incendio	1.35E-03	24	31	34	38

TOP 2 → Perdita di GPL

Dato un rilascio di 20 mc/h di liquido (cioè 1/10 della portata massima di carico/scarico) per la durata di 10 minuti (tempo necessario alla fermata delle pompe ed intercettazione della linea), si formerebbe una pozza di diametro 15-20 m, da cui evaporerebbe circa 180 Kg/min di vapori .

In caso di innesco ed esplosione :

- gli effetti letali sull'uomo e catastrofici sulle strutture arriverebbe a circa 15 metri ;
- gli effetti di inizio letalità sull'uomo con danni alle strutture arriverebbe a 60 metri ;
- gli effetti con lesioni reversibili sull'uomo con danni alle cose (es. rottura vetri) arriverebbe a 100m

Tale scenario incidentale che in assetto operativo originario è riferito alla Diga nell'assetto temporaneo è riferito nello studio al pontiletto.

Descrizione evento Primario	Frequenza accadimento evento Primario(acc/anno)	Scenario incidentale conseguente	Frequenza accadimento Scenario (acc/anno)	Elevata Letalità	Inizio Letalità	Lesioni Irreversibili	Lesioni reversibili
Perdita di GPL	2.39E-02	Esplosione	8.62E-04	15	60	-	100

TOP 3 → Perdita di stream benzolitico

Dopo un rilascio di 12 mc/h ovvero 1/10 della portata massima di movimentazione e per una durata di 10 minuti ovvero il tempo occorrente per la fermata della pompa e intercettazione della linea si creerebbe una pozza di circa 16 m i cui vapori non darebbeero origine a fenomeni di esplosività non raggiungendosi masse critiche.

I valori di irraggiamento risulterebbero essere:

- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 12,5 KW/mq:23 m → elevata letalità per l'uomo;
- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 7 KW/mq: 29 m → inizio letalità;
- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 5 KW/mq: 32 m → lesioni irreversibili;
- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 3 KW/mq: 35 m → lesioni reversibili;

Descrizione evento Primario	Frequenza accadimento evento Primario(acc/anno)	Scenario incidentale conseguente	Frequenza accadimento Scenario (acc/anno)	Elevata Letalità	Inizio Letalità	Lesioni Irreversibili	Lesioni reversibili
Perdita di Stream Benzolitico	1.62E-03	Incendio	5.83E-05	23	29	32	35

TOP 3 → Perdita di greggio

Vengono ipotizzati due scenari: uno conseguente a incendi a bordo di nave ormeggiata in campo boe e la seconda a seguito incendio per collisioni tra navi Nel primo caso si ipotizza rottura completa della tubazione di trasferimento con conseguente sversamento in mare e formazione pozza di 30 m di diametro e con innesco immediato. Nel secondo caso la fuoriuscita a seguito squarcio nella fiancata con rilascio da 130 mc/h e formazione pozza di diametro pari a 24 m.

Il primo scenario presenta conseguenze incidentali più gravose.

- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 12,5 KW/mq:38 m → elevata letalità per l'uomo
- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 7 KW/mq: 60 m → inizio letalità;
- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 5 KW/mq : 72 m → lesioni irreversibili;
- Massima distanza dall'epicentro con irraggiamento pari a 3 KW/mq: 80 m → lesioni reversibili;

Descrizione evento Primario	Frequenza accadimento evento Primario(acc/anno)	Scenario incidentale conseguente	Frequenza accadimento Scenario (acc/anno)	Elevata Letalità	Inizio Letalità	Lesioni Irreversibili	Lesioni reversibili
Perdita di Greggio	9.54E-03	Incendio	3.43E-04	38	60	72	80

5. EFFETTI DOMINO E NUOVA VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Sono stati forniti studi che pur partendo da scenari incidentali estremamente gravosi e con assunzioni molto conservative sui tempi di evoluzione del fenomeno che hanno portato alla conclusione che anche in assenza di misure mitigative in atto e senza intervento di personale assegnato alla gestione delle emergenze le conseguenze del danneggiamento dell'ipotesi più gravosa ossia il collasso delle linee del pipe rack del pontiletto non comporta la nascita di scenari incidentali diversi per natura e gravità di quelli già in atto con l'evento iniziatore.. L'unica conseguenza è un allungamento dei tempi dello scenario di incendio in cui lo stesso si evolve e si esaurisce Non esistono quindi nell'area altre apparecchiature che risultano bersaglio potenziale di irraggiamento Lo studio qui riportato ha approfondito l'analisi di rischio già contenuta nel Rapporto Integrato di Sicurezza Portuale - Ed. Ott. 2007, con riferimento all'esperienza storica internazionale specifica di settore (banca dati HSE britannica), nonché all'esperienza tecnico professionale di impianto. I dati di riferimento sono stati analizzati ed applicati ai volumi di traffico navale registrati a Gela per la determinazione quantitativa delle frequenze di accadimento dei vari scenari incidentali.

Considerato che, secondo le banche dati di riferimento, le tipologie di incidenti più frequenti nell'ambito dei porti petroliferi sono collisioni e/o rotture di linee di travaso con conseguente rilascio di prodotto, con riferimento alle installazioni portuali site in Testata Pontile, è stata ipotizzata, in via estremamente conservativa, la perdita simultanea, di benzina e di greggio

TOP 4 → la perdita simultanea di benzina e di greggio

La perdita simultanea, è stata ipotizzata per rottura totale delle rispettive tubazioni, di benzina e di greggio durante il travaso da navi ormeggiate alla banchina di levante e di ponente. ed stato inoltre supposto immediato l'innesco delle rispettive pozze, generando un duplice scenario da pool-fire.

Per quanto riguarda il calcolo della frequenza di accadimento, occorre tener conto che i due eventi (rilascio di benzina e rilascio di greggio) sono combinati secondo l'operatore logico "AND", dovendo essere verificati entrambi. Pertanto, la frequenza d'accadimento dello scenario di pool fire di benzina e di greggio sarà trascurabile e dell'ordine di 10 alla – 8.

6. PRESCRIZIONI FORMULATE DALLA CONFERENZA DEI SERVIZI E NUOVA PROPOSTA DI PROGETTAZIONE

Il rapporto di sicurezza presentato dalla Raffinerìa di Gela è stato quindi approvato con alcune prescrizioni che si sono rese necessarie in considerazione dei prolungarsi a tempo indeterminato dell'assetto temporaneo e della conseguente movimentazione di sostanze pericolose in testata pontile, anche perché è stato riscontrato che presso i punti di approdo dove vengono movimentate sostanze pericolose non sono state pienamente adottate le misure di sicurezze previste dalle norme di buona tecnica attualmente conosciute per la sicurezza nei porti petroliferi come quelle contenute, in particolare, nel Codice ILO sulla sicurezza neì porti e nella pubblicazione nota con l'acronimo ISGOTT.

In risposta alle prescrizioni formulate dalla Conferenza dei Servizi dei 29.10.08 in sede di valutazione dei "Rapporto di Sicurezza Portuale" la Raffineria di Gela ha elaborato un cronoprogramma con gli interventi da realizzare. In tale cronoprogramma non sono stati inseriti i tempi relativi all'ottenimento delle Autorizzazioni da parte delle Autorità competenti esterne in quanto non facilmente determinabili; la Raffineria di Gela si è adoperata per ottemperare tecnicamente a quanto prescritto attivando la sua struttura organizzativa tecnica per individuare le soluzioni atte a soddisfare i parametri di sicurezza previsti, e per programmare gli interventi realizzativi fino alla loro completa implementazione.

Per ciascuna prescrizione la raffineria aveva individuato la soluzione possibile e aveva cominciato anche le relative attività d'ingegneria. Successivamente è però stata fatta una rivisitazione degli interventi preannunciati. Attraverso uno studio la stessa Raffineria ha determinato che e soluzioni pensate all'inizio pur valide singolarmente non lo erano più nella loro globalità. Pur funzionando singolarmente, conducevano a possibili errori o generavano problemi sull'assetto di logistica della raffineria e del porto .

Caso emblematico è stato la problematica dei colpo d'ariete sulle tubazioni. L'adozione di un sistema di sgancio rapido " tradizionale " , ad esempio a wafer (tipo MIB), avrebbe condotto infatti , senza l'implementazione di numerose, radicali modifiche strutturali sulle tubazione e sui circuiti della movimentazione prodotti per l'impossibile gestione dell'onda d'urto generata dalla chiusura rapida dei sistema a seguito dello stacco d'emergenza. L'onda avrebbe potuto danneggiare i circuiti coinvolti compromettendo apparecchiature, pompe e tubazioni. Lo stesso si sarebbe potuto verificare per una chiusura intempestiva di una valvola motorizzata prodotta da un errore di manovra.

È stato pertanto elaborato e proposto alla Conferenza dei Servizi un nuovo sistema integrato

Il sistema integrato proposto in sintesi prevede l'implementazione di:

- tecnologie sganci rapidi;
- valvole da motorizzare;
- sistema rilevamento evento di sgancio imminente;
- nuova strumentazione;
- sistema di supervisione, controllo e sicurezza replica e trasmissione segnali, centro di controllo;

Del nuovo sistema integrato è stato proposto un nuovo cronoprogramma.

7. CONSIDERAZIONI FINALI

In seguito ad alcune difficoltà emerse sono state fatte a più riprese riunioni tese ad analizzare alcuni punti critici. E' doveroso sottolineare come, pur nell'ottica di un miglioramento perseguibile nei riguardi dei contributi che possono essere dati in sede di conferenza dei servizi per una più armonica procedura di valutazione del rapporto integrato di sicurezza, va però rilevato che così come evidenziato nello stesso decreto esiste una significativa norma transitoria. "Sino all'adozione del rapporto, l'autorità competente adotta nell'esercizio dei poteri di ordinanza e di regolamentazione,i provvedimenti anche interdettivi, necessari ad assicurare il rispetto dei livelli di sicurezza in Art. 5, comma 10 materia di rischi da incidenti connessi alle attività svolte dai soggetti di cui all'art.4, comma 2 del presente decreto".

Questa è stata la scelta che la Conferenza dei servizi per il porto di Gela ha adottato

Ma è questo uno dei limiti che la Conferenza ha di delegare all'autorità Portuale valutazioni e adozioni di regolamenti attribuendo alla stessa Autorità competenze e determinazioni che forse esulano dalle effettive competenze E in contrasto con lo spirito con cui questa norma è stata elaborata ossia che la sicurezza dipende da una attenta programmazione delle operazioni di gestione delle attività, basata su criteri oggettivi di misura e controllo in modo da evitare quei livelli di rischio che ora non potranno definirsi accettabili e non consentire il perdurare di situazioni non più accettabili.. Solo effettuando e completando l'analisi di rischio d'area si otterrà la verifica della compatibilità territoriale.

BIBLIOGRAFIA

[1] D.Lgs. 334/99 mod. ed integ. dal D.Lgs. 238 2005 "Attività a rischio di incidente rilevante";

[2] DM 293/2001 " Prevenzione degli incidenti rilevanti nei porti";

[3] Legge 18/1/1994 n° 84 " Riordino della Legislazione portuale";

[4] DM 9 maggio 2001 " Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti";

[5] D.Lgs. 203/2007 " Miglioramento della sicurezza dei porti".

sessione TEMATICA
ANALISI DEI RISCHI

Esempio di applicazione del metodo RBI "Risk based Inspection" nell'ottica di un nuovo approccio agli adempimenti imposti dal DM 1 dicembre 2004, n.329

*A. Nuzzo**
*E. De Benedictis***
*F. Ingravallo****

** Dipartimento Territoriale ISPESL di Bari*
*** RSPP centrale a ciclo combinato di Modugno (Sorgenia Puglia SpA)*
**** Resp. manutenzione meccanica centrale a ciclo combinato di Modugno (Sorgenia Puglia SpA)*

SOMMARIO

Il metodo RBI "Risck based Inspection" nell'ottica di un nuovo approccio agli adempimenti imposti dal DM 1 dicembre 2004, n.329. Lo caratterizza il duplice scopo di concentrare le ispezioni dove il rischio è più alto ottimizzando i piani di controllo e di aumentare la conoscenza degli impianti con maggiore consapevolezza dei rischi reali migliorando in generale il livello di sicurezza e di affidabilità degli impianti stessi. L'importanza nell'applicazione del metodo RBI della metodologia di feedback che implica un continuo aggiornamento e modifica del piano di ispezione. L'operazione di aggiornamento dello studio allo scopo di fornire una continua valutazione del grado di danneggiamento e la certezza che il danno non arrivi a livelli inaccettabili per una condotta in sicurezza dell'item e dell'impianto e al fine di trarre vantaggio dalle esperienze acquisite nel tempo.

Lo studio RBI quindi va visto come mezzo per future revisioni, basandosi sui risultati delle ispezioni programmate e per pianificare revisioni al piano di ispezione se necessario.

Presentazione di un esempio pratico per analizzare la metodologia RBI visionando tutti gli steps fondamentali della stessa partendo dal primo e fondamentale passo relativo alla raccolta di tutte informazioni relative all'impianto ed alle apparecchiature/linee interessate dallo studio:

- o Manuale operativo
- o P&ID
- o Disegni di progetto delle apparecchiature
- o Classi delle linee
- o Proprietà dei fluidi
- o Condizioni di progetto e di esercizio
- o Storia ispettiva
- o Ecc.

agli step di analisi successive:

- Individuazione dei meccanismi di danno
- Determinazione del Rischio
- Pianificazione delle Ispezioni
- Revisione.

1. INTRODUZIONE

Il "Risk based Inspection" è un processo di valutazione e gestione del rischio che a sua volta è il prodotto figurato tra la probabilità che un evento accada e la conseguenza dell'evento medesimo in termini sia di effetto sulle persone e sull'ambiente che di perdita economica.

I pericoli specifici che un industria può portare ai suoi lavoratori o alla popolazione circostante sono in estrema sintesi:

- l'incendio
- esplosioni
- immissioni di sostanze pericolose.

Negli impianti nei quali tali pericoli sono presenti, gli incidenti derivano quasi sempre dal mancato contenimento delle sostanze stoccate, manipolate o trasformate entro i componenti e sistemi a ciò destinati. Lo studio dei pericoli dell'industria di processo è in gran parte lo studio dei pericoli nei componenti e sistemi di contenimento di sostanze pericolose in particolare allorché tubazioni, recipienti o sistemi di processo risultano lavorare a pressione o suscettibili di essere sottoposti a pressione.

Per una corretta individuazione e riduzione del rischio globale è quindi doveroso effettuare valutazioni con un approccio strategico di prevenzione che si sostanzia nel processo riconosciuto con il termine di risk assestement condotto attraverso uno studio basato su due aspetti fondamentali:

- Uno studio preliminare dell'intero processo condotto al fine di determinare misure di prevenzione, protezione e mitigazione adeguate al pericolo da esso rappresentato ed i danni che potrebbero derivare dal verificarsi dell'incidente ipotizzato. Tale studio deve essere affrontato nella fase di progettazione al fine di realizzare un impianto sicuro.
- Uno studio successivo condotto al fine di preservare la sicurezza dell'impianto contro una cattiva gestione e l'inevitabile presenza di difetti causati da usura, tipica di impianti di processo, assumendo quindi carattere dinamico in tutte le fasi di vita dell'impianto.

È senza dubbio questa seconda fase, ossia l'aspetto gestionale, quella più critica in quanto una cattiva gestione degli impianti o una mancata adeguatezza dei controlli potrebbe inficiare la sicurezza di questi ultimi definita e stabilita in fase preliminare. Occorre per questo elaborare uno studio basato su controlli e valutazioni al fine di determinare i rischi imminenti e, attraverso adeguati calcoli, monitorare la vita spesa dell'impianto. Elemento essenziale di questa fase di lavoro è quindi elaborare un "Piano di controllo" legando la tempistica (intervelli di ricontrollo) e la tipologia di questi ultimi ad un'analisi di valutazione dei rischi indotta dagli impianti attraverso una "Risk base inspection".

2. PIANIFICAZIONE DEI CONTROLLI

Elemento essenziale per una gestione in sicurezza di un impianto di processo è la pianificazione dei controlli, essa rientra nella programmazione delle attività ispettive e come tale deve tenere in considerazione vari parametri connessi sia con la progettazione che alla costruzione delle singole apparecchiature di processo che con le condizioni di esercizio quest'ultimo ma soprattutto con la loro storia dell'esercizio.

Da tutte queste informazioni è possibile già identificare la maggior parte dei meccanismi di danneggiamento e conseguentemente ipotizzare le tipologie prevedibili di danno.

Le tecniche ispettive per i controlli vanno quindi scelte in funzione della loro idoneità ad individuare il danno prevedibile. Un buona pianificazione dei controlli segue le seguenti singole fasi:

- o Piano di controllo preliminare
- o Scelta delle tecniche ispettive
- o Estensione preliminare del programma ispettivo
- o Classificazione dei difetti riscontrati
- o Intensificazione dei controlli

2.1. Piano di controllo preliminare

Il piano di controllo preliminare deve essere redatto tenendo conto principalmente dei meccanismi di danno ipotizzati che scaturiscono analisi fatte tenendo conto soprattutto:

- o Tipo di apparecchiatura
- o Materiali
- o Trattamenti termici
- o Spessori
- o Temperatura di esercizio
- o Pressione di esercizio
- o Ambiente chimico di esercizio
- o Precedenti ispezioni
- o Incidenti
- o Riparazioni
- o Modifiche

Le tecniche ispettive per i controlli vanno inoltre scelte oltre che in funzione della loro idoneità ad individuare il danno prevedibile anche in base alle loro caratteristiche peculiari:

- o Compatibilità con il materiale indagato
- o Disponibilità dell'apparecchiatura
- o Tipo di alimentazione
- o Temperatura di lavoro

2.2. Scelta delle tecniche ispettive

La scelta delle tecniche ispettive è legata soprattutto all'esperienza e alle norme tecniche applicabili; di seguito si riporta la tabella 1 dove sono indicati a titolo puramente indicativo i controlli minimi da effettuare su ogni giunto saldato:

Elemento	Controllo di base	Controllo aggiuntivo
Materiale di base:		
Mantello	VT UTS	DM STE
Tubazioni	VT ST VTS MT (e/o PT)	DM ET
Estradosso	VT ST VTS MT (e/o PT)	DM HT
Pezzi speciali	VT ST VTS MT (e/o PT)	UT STE
Saldatura di composizione	VT ST VTS MT (e/o PT)	RT
Saldatura al mantello dei bocchelli di diametro >100m	VT ST MT (e/o PT)	RT
Saldatura al mantello dei bocchelli di diametro <100m	VT ST MT (e/o PT)	ET
Saldatura di elementi non in pressione a parti in pressione	VT PT (e/o MT)	ST
Superficie interne	VTE Alternativi	
UT:Ultrasuoni difettoscopici; RT:Esami radiografici; PT:Liquidi penetranti; VT:Esami visivi diretti; VTE:Esami visivi delle superfici interne con apparecchi endoscopici; HT:Misure di durezza		

Tabella 1

Nella tabella 1 sono indicati con il nome di controlli di base quei controlli ritenuti più idonei in relazione alla specificità del giunto saldato mentre sono definiti controlli aggiuntivi quelli integrativi da eseguirsi a discrezione del progettista/ispettore in aggiunta a quelli di base.

2.3. Estensione preliminare del programma ispettivo

Una volta scelte le tecniche ispettive per i controlli occorre determinare l'estensione quantitativa del programma ispettivo basato sulla densità e la variabilità del danno prevedibile. In particolare su ogni saldatura o materiale di base deve essere effettuata un estensione preliminare di primo tentativo che va determinata in funzione delle seguenti grandezze:

Livello di vita speso: percentuale di vita consumanta dal giunto saldato, dedotta dal calcolo eseguito in via preliminare con valori effettivi di pressione, temperatura e tempi e valori nominali di spessore;

Categoria di pericolosità dell'apparecchio: le attrezzature a pressione, in base all'allegato II della direttiva 97/23/CE (PED);

Criticità di saldatura: parametro che tiene conto delle conseguenze associate ad una eventuale rottura della saldatura.

L'estensione del controllo di ogni saldatura è individuato da un paramento qualificativo detto PEC (Parametro estensione controlli) variabile da 1 a 5 secondo un criterio di severità crescente.

Di seguito si riporta nel prospetto 1 una descrizione puramente qualitativa dell'estensione dei controlli associata a ciascun valore del PEC:

PEC	Estensione del controllo
1	Sufficientemente diffusa
2	Moderatamente diffusa
3	Mediamente diffusa
4	Altamente diffusa
5	Elevata

Prospetto 1

2.4. Classificazione dei difetti riscontrati

Dopo avere eseguito i controlli preliminari su ogni saldatura costituente il componente investigato secondo un estensione pari al valore del PEC preliminare è necessario valutare se intensificare o meno i controlli stessi. I difetti rilevati dovranno essere classificati secondo criteri che prendono in considerazione il tipo, l'estensione, la natura e le dimensioni del difetto.

Anche in questo caso si può far riferimento ad una classificazione indicizzata come riportato nel prospetto 2 che segue:

Classe del Difetto	Difetti riscontrati
1	Nessun difetto
2	Difettosità lieve
3	Difettosità media
4	Difettosità alta
5	Difettosità molto alta

Prospetto 2

2.5. Intensificazione dei controlli

Se i controlli preliminari hanno rilevato dei difetti può rendersi necessario intensificare i controlli in corso d'opera. A seconda della difettologia riscontrata, quantificata dalla classe di difetto, andrà aumentata l'estensione del controllo più idoneo a rilevarla, lasciando inalterata

l'estensione dei rimanenti controlli. A tal fine si riporta di seguito un prospetto (Prospetto 3) che identifica i controlli non distruttivi più efficaci per ogni tipo di difettologia.

Tecnica di ispezione	Riduzione di spessore	Difetti superficiali	Difetti volumetrici	Microfessure microvuoti	Variazioni metallurgiche	Variazioni dimensionali
UT:Ultrasuoni difettoscopici	X	2-3	1-2	2-3	X	X
RT:Esami radiografici	X	%	1-2	X	X	X
PT:Liquidi penetranti	X	1-3	X	X	X	X
VT:Esami visivi diretti	X	2-3	X	X	X	X
HT:Misure di durezza	X	X	X	X	3-X	X
MT:Esame magnetoscopico	X	1-2	3-X	X	X	X
UTS:Ultrasuoni spessimentrici	1	X	X	X	X	X
ET:Eddy currents	1-2	1-2	2-3	X	X	X
DM:Dimensionali	1-3	X	X	X	X	1-2
ST:Repliche metallografiche	X	1-2	X	1-2	1-2	X
STE:Repliche estrattive	X	X	X	X	1-2	X

1: Molto efficace; 2: Moderatamente efficace; 3: Di possibile efficacia; X: Di solito non utilizzato

Prospetto 3

Dall'analisi logica il verificatore dovrà integrare il piano dei controlli preliminare a seconda del risultato ottenuto. A tal fine alcuni controlli saranno eseguiti con estensione maggiore rispetto ad altri, giungendo a definire un set di grandezze (PECi) indicative dell'estensione dei controlli relativi, rispettivamente, ai difetti superficiali, a quelli volumetrici, al danno di creep e ai sottospessori.

2.6. Categoria dell'ispezione

Una volta scelte le tecniche ispettive e determinata l'estensione dei controlli su ogni tipologia di giunto saldato, anche in seguito all'eventuale intensificazione dei controlli, si arriva a definire l'efficacia del programma ispettivo detta brevemente Categoria di ispezione. Tale grandezza, relativa all'intero componente e non più al singolo giunto saldato, è classificata qualitativamente secondo categorie crescenti secondo il seguente prospetto (Prospetto 4):

Categoria	Descrizione
5	In grado di rilevare il danno in quasi tutti i casi
4	In grado di rilevare il danno nella maggior parte dei casi
3	Tale da garantire con una buona attendibilità l'individuazione dei difetti, il degrado del materiale e i sottospessori
2	Tale da garantire con media attendibilità l'individuazione dei difetti, il degrado del materiale e i sottospessori
1	Tale da garantire con sufficiente attendibilità l'individuazione dei difetti, il degrado del materiale e i sottospessori

Prospetto 4

Seguendo il flusso logico delle scelte definite nei paragrafi precedenti è evidente che in linea generale la Categoria di ispezione è strettamente correlata al Parametro Estensione Controlli. In tale evidenzia, è possibile incrementare o disunire l'efficacia del programma ispettivo agendo sul parametro PEC.

3. LA TECNICA "RISK BASED INSPECTION"

Lo scopo di questo tipo di analisi è quello di stabilire gli intervelli di ricontrollo; il principio su cui si basa questo studio è quello del calcolo di rischio al fine di ottimizzare le attività ispettive tenendo in considerazione sia la probabilità di rottura del componente sia le conseguenze associate alla rottura stessa, questo permetterebbe la determinazione degli intervalli di ulteriore esercizio dell'impianto che tengono conto del rischio indotto dal'utilizzo di un componente o di un apparecchiatura.

L'approccio da seguire per la determinazione degli intervalli di ricontrollo, è quindi, quello di individuare il livello di rischio associato al componente in esame mediante apposita procedura.

Successivamente a seconda del livello di rischio si individuano gli intervalli temporali di ricontrollo sulla scorta di criteri predeterminati.

Probabilità e conseguenza possono essere determinate mediate valutazioni globali di tipo qualitativo che individuano delle categorie. In generale il posizionamento del punto in un diagramma (Tabella 2) caratterizzato da aree di rischio crescente individua il livello indicativo di rischio (PRI – Parametro indicativo di rischio).

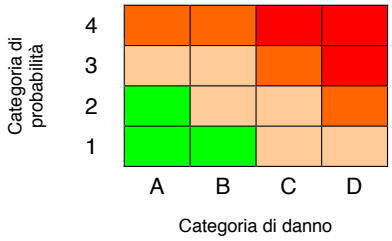


Tabella 2 Matrice di rischio

Per la determinazione della categoria di probabilità possono essere presi in considerazione vari fattori quali ad esempio tipo di danno, criteri di progettazione, tipo di processo.

La categoria di danno va determinata invece in funzione dei parametri di esercizio del componente (pressione, temperatura) nonché della natura del fluido contenuto (infiammabilità, tossicità ecc.). La categoria di danno tiene in considerazione quindi le conseguenze di incendio, di esplosione, di tossicità ed ambientale.

La determinazione sia della probabilità che del danno, possono essere condotte attraverso tre tipi di approcci:

- Qualitativo
- Semi-quantitativo
- Quantitativo

Se si hanno a disposizione dati statistici affidabili sulle frequenze di rottura si può procedere mediante un approccio quantitativo. Esso si differenzia da quello qualitativo per il fatto che sia la probabilità che il danno vengono quantificati da mediante procedure dettagliate.

L'impiego di tale approccio richiede disponibilità di banche dati sulla frequenza generica di rottura. In tale approccio il rischio viene qualificato mediante il prodotto numerico tra probabilità e danno anziché fare riferimento ad un ipotetica matrice.

In mancanza di dati sufficienti per l'analisi quantitativa si può procedere a quella semi-quantitaviva che, pur consentendo una maggiore precisione rispetto all'analisi qualitativa, risulta semplificata rispetto a quella puramente qualitativa sia per il calcolo della probabilità che per quello del danno.

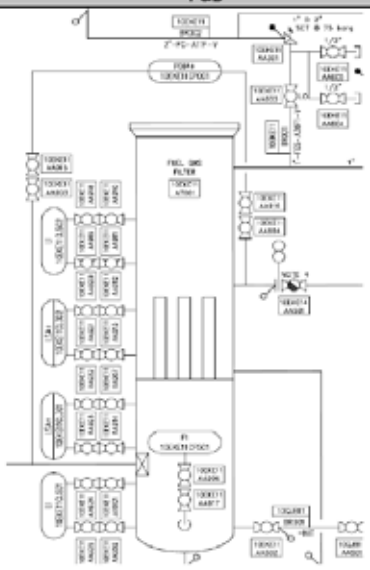
Lo studio va condotto secondo una sequenza logica che si sviluppa su di una serie di fasi:
- Analisi preliminari e raccordata dei dati
- Indagini e misurazioni
- Valutazione e calcoli

4. ESEMPIO APPLICATIVO

Si parte da un censimento del apparecchio/sistema attraverso la compilazione di una scheda tecnica:

ANAGRAFICA IMPIANTO											
STABBILIMENTO	*CENTRALE A CICLO COMBINATO DI TERMOLI*										
IMPIANATO	*STAZIONE DI RIDUZIONE, FILTRAZIONE E MISURAZIONE GAS METANO*										
UNITA' DI PROCESSO	*FILTRAZIONE*										
ANAGRAFICA APPARECCHIO											
APPARECCHIO	*FILTRO COALESCENTE*							N° DI SERIE	*10EKE11-AT001*		
TIPO	*FILTRO*							MATRIC.	*N.F.2680*		
DESCRIZIONE	*Il filtro è di tipo coalescente, produttore Parain costruito secondo le ASME VIII div.1 ed.01 + Ad.03, fa parte di una batteria di tre filtri collegati in parallelo, due in servizio e il terzo in pulizia/stand-by. La funzione del filtro è quello di eliminare le particelle solide e le goccioline di condensato presente nel gas in arrivo all'impianto, le particelle drenate vengono scaricate in un serbatoio di raccolta. Il sistema nel suo complesso è dotato di una valvola di sicurezza marca Dresser e di vari sistemi di controllo di livello e pressione, oltre a valvole e piping di connessione accessori. Per maggiori dettagli si veda disegno costruttivo 34A193-6517 SH1/2 e SH 2/2 e P&ID 2177 010 PID 021 021 1/1.*										
DATI INSTALLAZIONE											
Data di installazione	*2006*	Data di operatività	*2006*	Tempo residuo		Tempo di vita					
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE APPARECCHIO											
MATERIALE								Sovras.cor.(mm)	*3*		
Corrosione		Vol.	*1000*	Pres.Prog.	*75*	bar	Temp.Prog.	*60*	C°	PxV	*75000*
3	mm/anni			Pres.Eser.		bar	Temp.Eser.		C°		
CARATTERISTICHE FLUIDO											
FLUIDO	Gas Naturale	Gruppo PED	I	STATO FISICO	Gas						
TIPO DI PERICLO	*F+ "Infiammabile"*			CORROSIVO	SI ☐	NO ☑					
CATEGORIA PED	IV	ANALISI DEI RISCHI									
DICHI.CONFORMITA'	34A193/DC/A/1 del 12/01/2005	Si veda allegato Hazard analysis record.									
ATTEST.CONFORMITA'	PED MI.111 del 26/04/2005 Org.Sgs 1381										

P&D



SISTEMI DI SICUREZZA

TIPO	KKS	Caratteristiche
VS	*10EKE11AA301*	*DN 1/2" a PN 75,0 bar - Area:0,7097 - Rapporto di scarico 3827 Kg/h*

SISTEMI DI CONTROLLO

TIPO	KKS	Caratteristiche
LSA+	10EKE11CL301	Allarme alto livello primo stadio a DCS.
LSA+	10EKE11CL302	Allarme alto livello primo stadio a DCS.
LI	10EKE11CL501	Indicatore di livello primo stadio
LI	10EKE11CL502	Indicatore di livello secondo stadio
PI	10EKE11CP501	Incidatore di pressione
PDIA+	10EKE11CP001	Allarme alta perdita di carico

STATO DI CONSERVAZIONE ED EFFICIENZA

STATO APPARCCHIO		NOTE
☑	*IN FUNZIONE*	
☐	*IN RIPARAZIONE*	
☐	*DISMESSO*	

CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

Tipo di controllo	Periodicità	Ultima verifica	Esito	Note
Liquidi penetranti		14/01/2005	OK	Per identificazione si veda mappa dei controlli - cert.n°2737
Radiografie		14/01/2005	OK	Per identificazione si veda mappa dei controlli - cert.n°191/04
Prova idraulica		14/01/2005	OK	Si veda certificato N°24765
Prova pneumatica		14/01/2005	OK	Si veda certificato N°24770

ESAME VISIVO

DISCONTINUITÀ RILEVATE

Localazzizione	Denominazione	Classe	Note

PERIODICITA' ESAME		ESITO	Positivo nessun difetto riscontrato per dettaglio si veda certificato N°24762
DATA ULTIMA VERIFICA	14/01/2005		

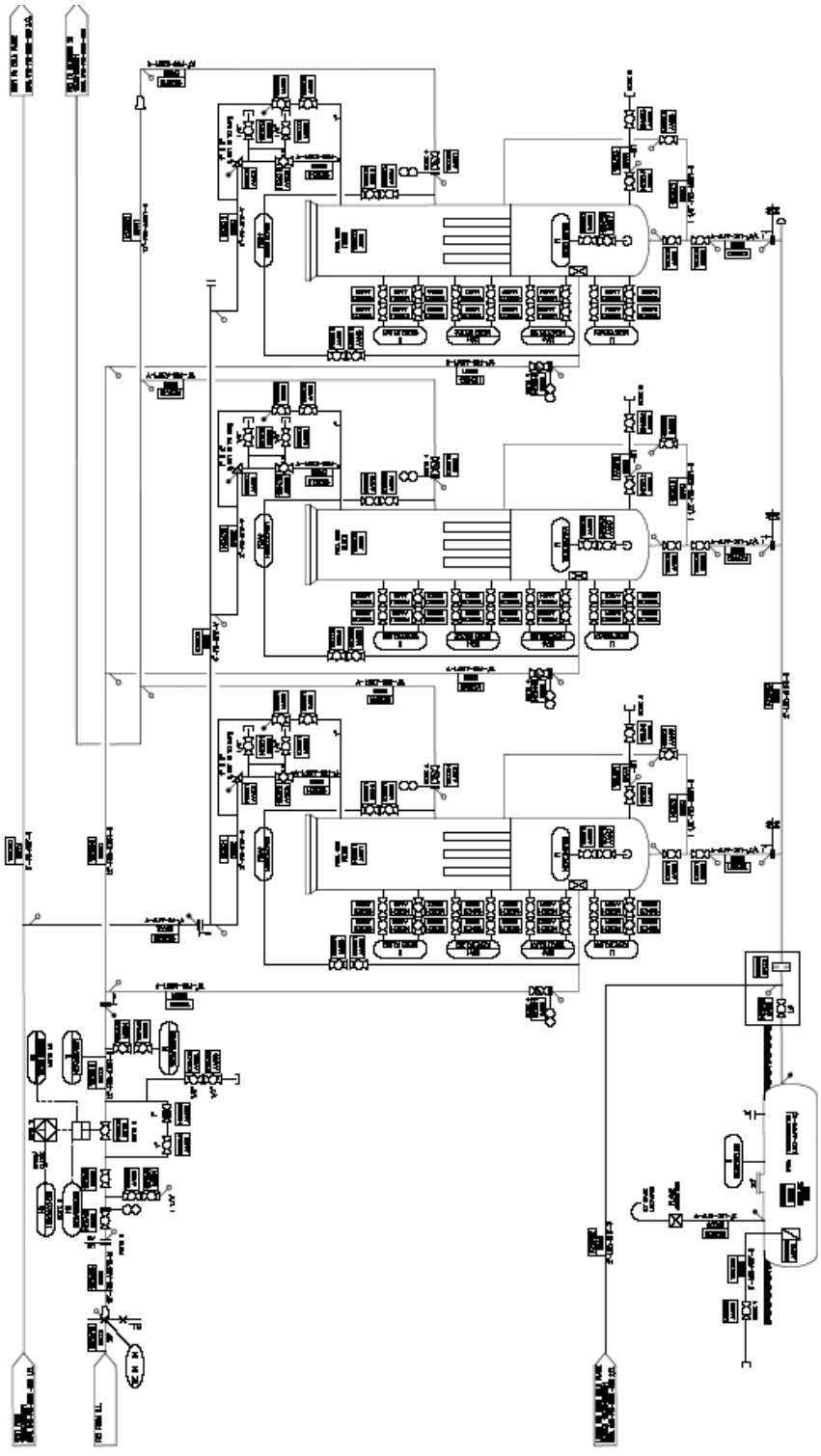
CONTROLLI SUI SISTEMI DI SICUREZZA

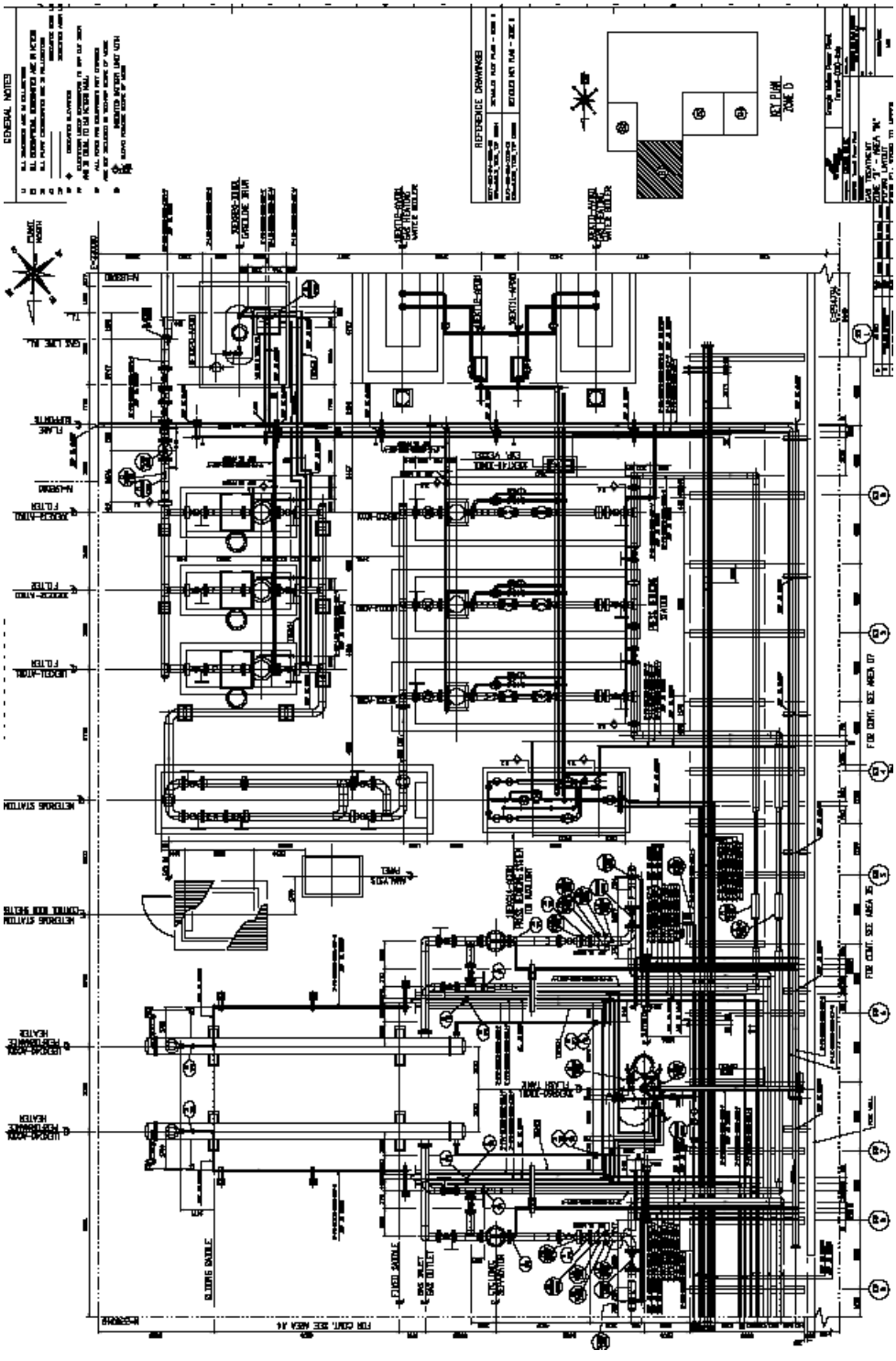
TIPO	KKS	Tipo di controllo	Periodicità	Ultima verifica	Esito	Note
VS	*10EKE11AA301*	*Taratura*	*biennale*	*12/08/2008*	*ok*	

VERIFICA SUI SISTEMI DI CONTROLLO

TIPO	KKS	Tipo di controllo	Periodicità	Ultima verifica	Esito	Note
LSA+	*10EKE11CL301*	*Prova idraulica e funzionale*		*07/12/2004*	*ok*	*Rap.N°62470/107B*
LSA+	*10EKE11CL302*	*Prova idraulica e funzionale*		*07/12/2004*	*ok*	*Rap.N°62470/107B*
LI	*10EKE11CL501*	*Prova idraulica*		*18/01/2005*	*ok*	*Cert.n°340736/02*
LI	*10EKE11CL502*	*Prova idraulica*		*18/01/2005*	*ok*	*Cert.n°340736/02*
PI	*10EKE11CP501*	*Verifica funzionale*		*04/01/2005*	*ok*	*Rap.N°5421/2005*
PDIA+	*10EKE11CP001*	*Prova idraulica*		*23/12/2004*	*ok*	*Cert.n°64040304 18/04*

CONTROLLO				Ultima verifica
IL TECNICO RESPONSABILE DEI CONTROLLI	*TIPO DI CONTROLLO*	☐	*Valutazione stato d'efficienza*	
		☐	*Verifica periodica di funzionamento*	
		☐	*Verifica periodica di integrità*	
		☐	*Altro*	





4.1. Piano di controllo preliminare

Per questa tipologia di componenti, si attribuiscono, in base alla documentazione analizzata e alla osservazione riscontrate, i seguenti livelli di criticità:

Molto basso (A) alle saldature delle parti non in pressione (selle appoggi)

Un grado basso (B) alle saldature fra filtro e tronchetti (De > 100);

Un grado medio-alto (C) alle saldature fra il filtro e grosse penetrazioni per tubi di diametro di collegamento (De ≤ 100);

Un livello di criticità alto (D) alle saldature circonferenziali di composizione di collettori o tubazioni.

I controlli in funzione dei livelli di criticità individuato sono riassunti nel seguente prospetto:

Criticità della saldatura	Tipi di CND da effettuare	
	Obbligatori	Aggiuntivi
A	VT, PT (o MT)	ST
B	VT, ST, MT, (o PT)	ET
C	VT, ST, UT, MT (o PT)	RT
D	VT, ST, UT, MT (o PT)	RT
E (MATERIALE DI BASE)	VT, UTS	DM

Dai dati a disposizione possiamo parametrizzare la percentuale di vita spesa pari ad a.

LIVELLO	**a**	**b**	**g**	**d**
Percentuale vita consumata	0 - 25%	25 - 60%	60 - 90%	90 - 100%

In base al prospetto sottostante si determinano, per ogni saldatura, i valori del PEC (parametro indicativo della estensione preliminare del controllo) corrispondenti ai livelli di vita spesa e alle categorie di pericolosità dell'apparecchio secondo la PED.

		Livello di vita speso			
		a	**b**	**g**	**d**
Categoria di pericolosità PED dell'apparecchio	I	1	1	2	2
	II	1	2	2	3
	III	2	2	3	4
	IV	2	3	4	5

Nel nostro caso ne consegue che la PECp preliminare pari a 2 corrispondente ad un estensione del controllo moderatamente diffusa.

			ESTENSIONE CONTROLLI (PEC)				
CRIRICITA' DELLA SALDATURA	Tipo di CND		Limitata PEC 1	Limitata PEC 2	Limitata PEC 3	Limitata PEC 4	Limitata PEC 5
A: Collettrore/parti non in pressione	Base	VT	100%	100%	100%	100%	100%
		(PT o MT)	60%	70%	80%	90%	100%
	Aggiuntivi	ST	*	*	*	*	*
B:Collettore/branchetti	Base	VT	100%	100%	100%	100%	100%
		ST	1% saldature (max2, min1)	1,5% saldature (max2, min1)	2% saldature (max2, min1)	3% saldature (max2, min1)	5% saldature (max2, min1)
		(PT o MT)	Sul 10% delle saldature	Sul 20% delle saldature	Sul 30% delle saldature	Sul 40% delle saldature	Sul 50% delle saldature
	Aggiuntivi	ET	*	*	*	*	*
C:Collettore/grosse penetrazioni	Base	VT	100%	100%	100%	100%	100%
		ST	1	1	2	2	2
		UT	70%	80%	90%	100%	100%
		(PT o MT)	70%	80%	90%	100%	100%
	Aggiuntivi	RT	*	*	*	*	*
D:Saldature di composizione o fasciame/fondi	Base	VT	100%	100%	100%	100%	100%
		ST	1	1	2	2	2
		UT	80%	90%	100%	100%	100%
		(PT o MT)	70%	80%	90%	100%	100%
	Aggiuntivi	RT	*	*	*	*	*
E:Materiale base	Base	VT	100%	100%	100%	100%	100%
		UTS	**	**	**	**	**
	Aggiuntivi	DM	*	*	*	*	*
Superficie interne	Base	VTE	20%	30%	50%	80%	100%

* a descrizione progettista/ispettore ** mappatura da definire

Avendo scelto una PEC preliminare pari a 2 il piano dei controlli, per lo specifico esempio, si presenta nel seguente modo:

	Tipo di CND		Estensione moderata PEC2
A: Collettrore/parti non in pressione	Obbligatori	VT	100%
		PT (o MT)	70%
	Addizionali	ST	-
B:Collettore/branchetti	Obbligatori	VT	100%
		ST	1,5 saldature (max2)
		MT (o PT)	sul 20% delle saldature
	Addizionali	ET	-
C:Collettore/grosse penetrazioni	Obbligatori	VT	100%
		ST	1
		UT	80%
		MT (o PT)	80%
	Addizionali	RT	-
D:Saldature di composizione o fasciame/fondi	Obbligatori	VT	100%
		ST	1
		UT	90%
		MT (o PT)	80%
	Addizionali	RT	-
E:Materiale base	Obbligatori	VT	100%
		UTS	Numero di punti per sezione n=4, distanza tra le sezioni
	Addizionali	DM	-
Superficie interne	Base	VTE	30% (se accessibile internamente)

4.2. Classificazione dei difetti riscontrati

Supponiamo che i risultati del controllo eseguito in accordo al PECp preliminare sopra riportato abbiamo portato a rilevare:

Tre cricche superficiali su saldatura tipo B (branchetti/collettore), profondità 4 mm.

Le classi di difettologia corrispondenti sono le seguenti:

Cricche superficiali CD1=4 (facendo riferimento alla successiva Tabella 3

p<2 n≤2	p<2 n≤2	p<1 n≤2	p<1 n≤2	1	Classe di difetto
p<2 n>2	p<2 n>2	p<1 n>2	p<1 n>2	2	
p≥2 n≤2	p≥2 n≤2	p≥1 n≤2	p≥1 n≤2	3	
2≤p<5 n>2	2≤p<5 n>2	2≤p<5 n>2	2≤p<5 n>2	4	
p≥5 n>2	p≥5 n>2	p≥4 n>2	p≥4 n>2	5	
A	B	C	D		
Criticità della saldatura					

p:Profondità dei difetti; n:numero dei difetti

Tabella 3

4.3. Intensificazione dei controlli

Applicando quanto riportato nei paragrafi precedenti si deduce che in relazione ai difetti riscontrati sulle saldature deve essere intensificato il controllo con i liquidi penetranti e quello della replica.

In particolare ipotizziamo di estendere il controllo di un livello pari alla classe del difetto riscontrato.

La nuova estensione dei controlli sulle saldature è pertanto deducibile dal seguente prospetto:

	LP(o MT o ET)	ST
Estensione preliminare	PECp=2 sul 20% delle saldature	PECp=2 sul 1,5% delle saldature (max2, min1)
Nuova estensione	PECa=4 sul 40% delle saldature	PECp=3 sul 2% delle saldature (max2, min1)

Come evidenziato nella tabella sopra riportata ciò comporta un estensione del controllo LP (o MT o ET) del 20%, passando da un 20% ad un 40% delle saldature, ed un incremento del numero totale di repliche.

Sulle rimanenti saldature e sul materiale di base, non essendosi rilevati difetti, degrado del materiale e sottospessori, non si rende necessaria l'intensificazione dei controlli.

Se il nuovo controllo cosi eseguito rilevasse dei difetti occorrerà iterare nuovamente la procedura descritta per determinare gli ulteriori controlli aggiuntivi.

4.4. Categoria di ispezione

I controlli complessi eseguiti sono riassunti nel seguente prospetto:

	Tipo di CND		Estensione
A: Collettrore/parti non in pressione	Obbligatori	VT	PEC 2
		PT (o MT)	PEC 2
B:Collettore/branchetti	Obbligatori	VT	PEC 2
		ST	PEC 3 (intensificato)
		MT (o PT)	PEC 4 (intensificato)
C:Collettore/grosse penetrazioni	Obbligatori	VT	PEC 2
		ST	PEC 2
		UT	PEC 2
		MT (o PT)	PEC 2
D:Saldature di composizione o fasciame/fondi	Obbligatori	VT	PEC 2
		ST	PEC 2
		UT	PEC 2
		MT (o PT)	PEC 2
E:Materiale base	Obbligatori	VT	PEC 2
		UTS	PEC 2
Superficie interne	Base	VTE	PEC 2

Come è evidente l'estensione dei controlli è mediamente di livello PEC 2, tranne per due soli controlli per i quali si rispettivamente PEC 3 e PEC 4.

La categoria dell'ispezione può pertanto considerarsi di livello 2, mediamente efficace.

4.5 Individuazione del livello di rischio

Al fine di determinare il livello di rischio utilizziamo una procedura semplificata applicando degli indici di sicurezza prendendo in considerazione il fluido contenuto nell'apparecchiatura.

4.5.1. Probabilità di rottura

In luogo della probabilità di rottura viene qui considerato (per semplicità) l'indice di danno (PID – parametro indicativo del danno) definito in funzione della classe del difetto (numero, profondità, lunghezza) e alla classe di danneggiamento come di seguito riportato nel seguente prospetto:

CLASSE DEL DIFETTO	5	II	III	IV		(*)
	4	II	III	IV	V	(*)
	3	II	II	III	IV	(*)
	2	I	II	III	IV	(*)
	1	I	II	III	IV	(*)
PID		1	2	3	4	5
		CLASSE DEL DANNO				

(*) Riparazione globale della saldatura

Nell'esempio in considerazione in cui la classe del difetto è pari a 4 e la classe del danno micro strutturale è pari a 3, si deduce, dalla tabella, un PID pari a IV nella saldatura di tipo B (la più danneggiata).

4.5.2. Conseguenze di rottura

Una volta definito il parametro indicativo del danno (PID), correlabile alla probabilità di rottura del componente, occorre tenere in considerazione quali conseguenze possono derivare dalla rottura stessa. Per il caso specifico in considerazione bisogna tenere presente l'aggravante che il fluido contenuto dall'apparecchio risulta pericoloso in particolare esplosivo. Per la determinazione del indice di rischio è possibile definire un parametro correlativo tra indice di danneggiamento e livello di criticità della saldatura introducendo in questo modo un ulteriore parametro (PIR:Parametro Indicativo del Rischio) . Questa correlazione è riportata nel seguente prospetto:

PID	V	PIR 4	PIR 5	PIR 5	PIR 5
	IV	PIR 4	PIR 4	PIR 5	PIR 5
	III	PIR 3	PIR 3	PIR 4	PIR 5
	II	PIR 2	PIR 2	PIR 3	PIR 3
	I	PIR 1	PIR 1	PIR 1	PIR 1
		A	B	C	D
		Livello di criticità saldatura			

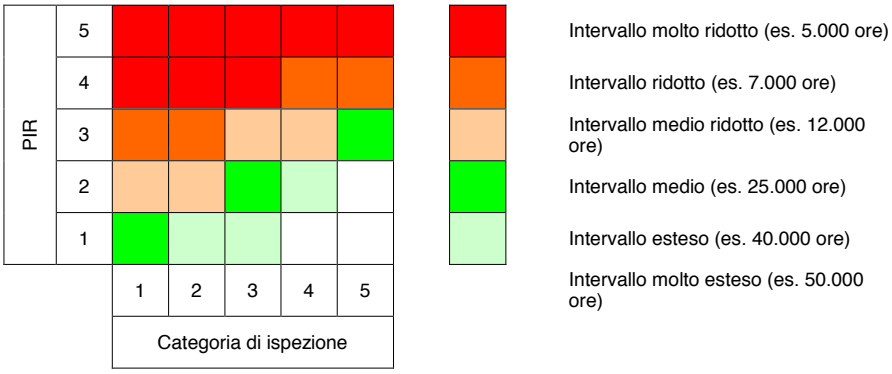
Dal prospetto precedente si deduce, per l'esempio in considerazione, che la saldatura di tipo B ha un livello di rischio elevato identificato da un parametro PIR pari a 4, mentre le altre saldature hanno un livello molto basso pari ad 1, non essendosi rilevate indicazioni. Il riassunto di quando detto è riportato nel seguente prospetto:

SALDATURA	Classe Difetto	Classe Microstruttorale	PID	PIR
A: Collettrore/parti non in pressione	1	1	I	1
B:Collettore/branchetti	4	3	IV	4
C:Collettore/grosse penetrazioni	1	1	I	1
D:Saldature di composizione o fasciame/fondi	1	1	I	1
E:Materiale base	1	1	I	1

PID: Indice di danno; PIR:Indice di rischio

4.5.3. Determinazione degli intervalli di ricontrollo

L'intervallo di ricontrollo successivo può essere determinato in funzione del valore massimo del PIR e della Categoria dell'ispezione facendo riferimento al seguente prospetto:



Nel caso specifico in esame essendo il PIR massimo uguale a 4 e la Categoria d'ispezione pari a 2, è necessario un intervallo molto ridotto di ricontrollo (5000 ore).

Incrementando l'estensione dei controlli si può ammettere un intervallo di ricontrollo più ampio (7000 ore) incrementando da 2 a 4 la categoria di ispezione. Una siffatta categoria potrebbe essere ottenuta, ad esempio, aumentando da 2 a 4 il livello PEC su ogni saldatura.

L'intervallo di ricontrollo effettivo è il minimo tra quello determinato dalle precedenti considerazioni (DI), 50.000 ore e il 60% della vita residua:

Intervallo di ricontrollo = min [DI, 50.000, (60% Hr)]

Intervallo di ricontrollo = 5000 ore (PEC2)

Intervallo di ricontrollo = 7000 ore (PEC2)

5. CONCLUSIONI

Dai capitoli precedenti si evince che per una corretta valutazione e gestione dei rischi di impianto è necessario realizzare un regolare piano di controllo che permetta di valutare lo stato di ogni singolo apparecchio e insieme. La gestione di tale piano, date le peculiari caratteristiche di pressione e temperatura estremamente pericolose se non tenute sotto controllo per tutte le fasi di processo e di vita del sistema stesso, risulta essere di grande complessità. Una corretta

valutazione del rischio non può quindi prescindere dalla valutazione dell'integrità strutturale condotta con una metodica correttamente pianificata e progettata attraverso una analisi che si sviluppa in fasi sequenziali di controlli e valutazione dei risultati. In questo ambito risulta estremamente interessate introdurre attraverso un "Risk based Inspection" l'idea di pianificare temporalmente i controlli in funzione di una analisi di rischio che risulta essere un valore aggiunto. Infatti legando le scelte non solo alla soggettività del pianificatore o a regole tecniche ma anche a valori oggettivi che prendano in considerazione aspetti strettamente legati a concetti nuovi come prevenzione e protezione di beni e vite umane si raggiunge lo scopo di garantire l'efficienza in termini non solo di resa produttiva ma anche e soprattutto di tutela dell'uomo.

BIBLIOGRAFIA

- Direttiva Europea 87/404/CEE
- Direttiva Europea 97/23/CE
- Raccolte CTI / UNI / API
- Ispezioni basate sul rischio RBI
- Raccolte Ispesl

sessione TEMATICA
ANALISI DEI RISCHI

Gestione integrata dei controlli delle attrezzature a pressione negli stabilimenti Seveso

P. A. Bragatto* - P. Pittiglio* - S. Ansaldi* - P. Agnello*
**ISPESL DIPIA - Centro Ricerche Monteporzio*

SOMMARIO

Viene presentato un prodotto per gestire controlli e verifiche di attrezzature ed impianti all'interno di uno stabilimento industriale. Il prodotto tiene conto delle novità introdotte in questa materia dal D.Lgs 81/08 e si presta ad essere integrato con il sistema di gestione della sicurezza. Il prodotto è sostanzialmente un database nel quale si archiviano tutte le attrezzature, assieme alle risultanze delle ispezioni svolte nel ciclo di vita delle stesse. Una interfaccia grafica molto semplice permette di consultare ed aggiornare il database centrale da postazioni remote, anche mobili. È possibile definire, in base alla classificazione del rischio, delle priorità d'ispezione per i singoli apparecchi.

Il software è particolarmente adatto agli stabilimenti Seveso, dove il sistema di gestione è obbligatorio e soggetto ad audit da parte delle autorità competenti. Può anche essere applicato ad uno stabilimento non Seveso, dove la complessità ed il numero delle attrezzature pericolose, in pressione e no, lo possono rendere necessario.

1. INTRODUZIONE

Il D.Lgs. 81/2008 ha introdotto molte novità in materia di attrezzature di lavoro e relativi controlli e verifiche. In particolare vengono distinte verifiche e controlli. Le verifiche hanno carattere cogente e vengono svolte dagli enti di controllo, con periodicità definita, per tutta una serie di attrezzature chiaramente indicate nel testo. I controlli devono essere fatti su tutte le attrezzature che nel corso del tempo possono per guasti o deterioramento essere pericolose per i lavoratori. Il datore di lavoro gestisce i controlli in autonomia, tenendo conto delle indicazione dei costruttori, delle norme di buona pratica e della valutazione dei rischi, ma del quale deve comunque rendere ragione agli organi di sorveglianza. Queste novità creano notevoli difficoltà, nella gestione delle attrezzature degli stabilenti industriali complessi, quali gli stabilimenti soggetti al D.Lgs 334/99 (Seveso). In questo lavoro si presenta un software, finalizzato ad aiutare i gestori ad organizzare al meglio le attività ispettive sulle attrezzature pericolose. La letteratura sull'organizzazione delle attività ispettive in stabilimenti complessi è molto ampia. Per organizzare un programma di ispezioni bisogna tener conto non solo dei livelli di rischio dei singoli apparecchi, ma anche dei vincoli normativi cogenti, della possibilità o meno di ispezionare gli apparecchi in esercizio, degli eventuali costi di fermo oltre che del budget a disposizione per le ispezioni. La difficoltà di rispondere in modo ottimale a tutti questi contrastanti obiettivi non viene risolta neppure con l'approccio Risk Based, che non tiene conto delle altre esigenze sopra indicate. È necessario raggiungere il migliore controllo possibile ben sapendo che comunque le ispezioni sono, per definizione, sempre imperfette ed incomplete. La questione è stata ampiamente discussa da un punto di vista teorico in una articolo di Kallen e van Noortwijk [1]. Partendo da tale lavoro gli autori del presente lavoro avevano proposto in precedenti lavori un metodo seppure empirico per arrivare ad un punto di equilibrio fra le diverse esigenze, almeno

negli stabilimenti Seveso di piccola e media dimensione [2-6]. Il software qui presentato rappresenta un'evoluzione dei risultati dei precedenti lavori, in particolare alla luce delle importanti novità del D.Lgs 81/08 in tema di attrezzature di lavoro.

Nel secondo capitolo vengono discusse nel dettaglio le modalità di gestione, controlli e verifiche sulle attrezzature, alla luce del testo unico. Vengono evidenziate in particolare le difficoltà che il gestore può incontrare ed alle quali lo sviluppo qui presentato intende rispondere. Nel terzo capitolo si dettagliano gli obiettivi dello sviluppo. Il quarto capitolo è sulle tecniche software adottate nello sviluppo. I due capitoli successivi sono dedicati al prodotto realizzato, denominato "myInspection", ed alla sua modalità di utilizzo. Infine nel capitolo conclusivo si discutono i possibili sviluppi del progetto.

2. LA GESTIONE DEI CONTROLLI E DELLE VERIFICHE DELLE ATTREZZATURE NEL D.LGS 81/08 E NEL D.LGS 334/99

2.1. La gestione delle attrezzature nel D.Lgs 81/08

L'articolo 71 al comma 8 richiede a tutti i datori di lavoro di svolgere dei controlli periodici sulle attrezzature di lavoro al fine di prevenire guasti e malfunzionamento con conseguenze avverse per i lavoratori che utilizzano tali attrezzature. I controlli vengono organizzati autonomamente dal datore di lavoro, ma devono rispondere ad una serie di requisiti. Innanzitutto devono essere svolti da persone qualificate. Le modalità e le frequenze dei controlli devono essere stabilite in base alle indicazioni dei fabbricanti oppure a norme di buona tecnica o a codici di buona prassi. Inoltre ogni volta che intervengano eventi eccezionali che possano avere conseguenze negative per la sicurezza, quali riparazioni, trasformazioni, incidenti, fenomeni naturali o periodi prolungati di inattività, le attrezzature devono essere sottoposte a controlli straordinari. Non vi sono invece obblighi sulla strategia dei controlli. Il datore di lavoro organizzerà il calendario delle ispezioni interne in base alla strategia manutentiva adottata, che può essere predittiva, preventiva, o correttiva, nonché alle valutazione dei rischi specifici. Gli organi di vigilanza possono richiedere ai datori di lavoro di dimostrare le attività svolte e vi è quindi l'obbligo di conservare, per almeno tre anni, traccia dei risultati dei risultati dei controlli eseguiti.

Oltre ai controlli liberamente gestiti, ci sono le verifiche periodiche di tipo obbligatorio, che, seppure sotto denominazione diverse (riqualificazione periodica), sono presenti da molti decenni nella legislazione italiana. In base all'art. 71 del D.Lgs. 81/08 tali verifiche sono svolte da parte degli enti di controllo (ISPESL per la prima verifica e ASL per le successive). Sotto alcune condizioni i compiti di verifica posso anche essere delegati a soggetti terzi, pubblici o privati. Per le frequenze si fa riferimento all'allegato VII, dove per attrezzature di sollevamento, attrezzature in pressione, idroestrattore e caldaie, sono dettagliatamente specificate frequenze e modalità d'ispezione, in funzione delle rispettive classi di appartenenza. Va sottolineato che i controlli pubblici seguono comunque una strategia d'ispezione di tipo preventivo.

Nel caso il gestore voglia usufruire dei vantaggi, in termini di responsabilità ed incentivi, derivanti dall'adozione del sistema di gestione dovrà, ovviamente, inserire i controlli all'interno del sistema stesso. L'art. 30 comma 1 del D.Lgs 81/08, fra i requisiti essenziali del sistemi di gestione, cita, al punto a), il rispetto degli standard tecnici su attrezzature ed impianti. Al punto h) del comma sopra citato si prevede la verifica periodica dell'efficacia delle procedure applicate. In pratica il modello di gestione deve prevedere degli audit, nell'ambito dei quali dovranno essere dimostrata l'adeguatezza dei controlli, nonché, ovviamente, la rispondenza delle verifiche alle periodicità di legge.

2.2. Specificità stabilimenti ex D.Lgs 334/99

Negli stabilimenti Seveso le conseguenze di guasti o malfunzionamenti delle attrezzature possono estendersi dai lavoratori che le utilizzano in un singolo reparto ai lavoratori (dipendenti e terzi) presenti nei vari reparti dello stabilimento, nonché per lavoratori degli stabilimenti confinanti e cittadini presenti nell'intorno dello stabilimento.

I datori di lavoro in questi stabilimenti, fatti salvi tutti gli altri obblighi in tema di sicurezza del lavoro, sono sottoposti ad ulteriori obblighi, fra cui quello di avere un sistema di gestione

della sicurezza, nella quale rientrano ovviamente tutte le attività di controllo svolte per prevenire i guasti o malfunzionamenti delle attrezzature di lavoro. Elementi essenziali del sistema di gestione sono la programmazione dei controlli (quelli gestiti in autonomia e quelli con frequenza obbligatoria), la registrazione dei risultati, la dimostrazione puntuale delle attività svolte nelle varie occasione di verifica del sistema. I requisiti minimi del sistema di gestione sono definiti dal Decreto Ministero dell'Ambiente 9 agosto 2000, che all'articolo 8 richiede che le attività di ispezione e verifica siano organizzate in modo da garantire l'affidabilità e disponibilità prevista per ogni parte dell'impianto, rilevante ai fini della sicurezza, in congruenza con quanto assunto a base delle valutazioni di rischi eseguite. Il sistema di gestione della sicurezza può anche essere formalmente impostato sulla base del BS 18001:07 [7], è però essenziale che i contenuti rispondano ai requisiti sopraindicati. Va ricordato che l'Italia è l'unico paese ad aver pubblicato, con UNI 10617:09 [8] , uno standard per il sistema di gestione degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante; che può essere di indubbia utilità.

Va sottolineato che il sistema di gestione della sicurezza prevede oltre agli audit a carico del Gestore, che sono presenti in qualsiasi sistema di gestione, anche le visite periodiche da parte di ispettori incaricati dalle autorità competenti (Regioni o Ministero dell'Ambiente), come previste dalla normativa europea, recepita dal D.M 5 novembre 1997. Queste non sono altro che audit "obbligatori", che vengono svolti secondo protocolli definiti dalle autorità competenti.

Come detto al paragrafo precedente ogni datore di lavoro, che adotti il sistema di gestione della sicurezza, è in particolare tenuto ad organizzare e dimostrare i controlli sulle condizioni delle attrezzature per prevenire guasti e malfunzionamento. A maggior ragione questo deve essere fatto negli stabilimenti Seveso, dove il sistema di gestione ha carattere di obbligatorietà. La dimostrazione delle attività di controllo svolte può essere richiesta, seppure con modalità e fini diversi, sia dalle autorità competenti per la vigilanza degli ambienti di lavoro che dai verificatori del sistema di gestione, siano essi auditor privati o ispettori incaricati dalle autorità competenti.

2.3. Difficoltà nell'applicazione

L'organizzazione dei controlli su un gran numero di attrezzature differenti, per le quali possono impiegarsi tecniche e metodi disparati è già questione complessa. L'obbligo di dimostrarla a soggetti esterni e la necessità di inserirla in un sistema di gestione più complesso rendono il lavoro ancora più difficile come discusso in alcuni lavori recenti da vari autori, fra cui Wood, che basa le sue valutazioni su una estesa rassegna delle esperienze ispettive in tutti i paesi aderenti all'unione europea[9]. In pratica, in un impianto soggetto alla Direttiva Seveso, le varie attività connesse alla sicurezza degli apparecchi dalla progettazione alla costruzione, dalla manutenzione alla dismissione, non possono essere viste in modo separato per ogni singolo apparecchio; ma vanno gestite in modo integrato, tenendo innanzitutto conto dei rischi di incidente rilevante derivanti dalle caratteristiche chimiche dei fluidi contenuti negli apparecchi. Nel caso di ditte medio piccole (e molte ditte Seveso lo sono) questo lavoro può risultare improbo, in relazione alle scarse risorse disponibili. Per questo motivo emerge la necessità di avere strumenti che facilitino questo lavoro.

3. OBIETTIVI

L'obiettivo è quello di avere un prodotto software di ausilio all'attuazione degli adempimenti in materia di attrezzature di lavoro, tenendo conto della necessità di inserire verifiche e controlli nell'ambito del sistema di gestione della sicurezza.

Il sistema deve essere utilizzabile anche sul campo in modo da avere una situazione dei controlli aggiornata in tempo reale (monitoraggio delle condizioni).

3.1. Target dell'applicazione

I potenziali utilizzatori sono i gestori di stabilimenti industriali soggetti al D.Lgs 334/99. Anche gli enti di controllo ISPESL e ASL possono essere interessati all'utilizzo del sistema (ovviamente solo per gestire i controlli obbligatori secondo le proprie competenze).

3.2. Principali funzioni richieste

> Programmare i controlli sulle varie attrezzature (in particolare in pressione e di sollevamento)
> Registrare i Risultati
> Presentarli in modo adeguato

4. CARATTERISTICHE DI "MYINSPECTION"

"myInspection" permette di gestire il calendario dei controlli e delle verifiche sulle attrezzature di lavoro archiviandone i risultati per successive elaborazioni. Si presenta con una interfaccia a bottoni che aprono i moduli in cui è articolato il software. Nella figura 1 si riporta il "cruscotto" iniziale del software.

4.1. Archivio attrezzature da sottoporre ad ispezione (moduli "stabilimento" e "matrice di rischio")

Il primo passo è la creazione di un archivio delle attrezzature suscettibili di dare origine a situazioni pericolose, fra cui le attrezzature espressamente menzionate nell'allegato VII del D.Lgs 81/08 (attrezzature in pressione, attrezzature di sollevamento, le caldaie idroestrattori). Ovviamente il sistema è abbastanza flessibile da poter inserire anche altre attrezzature pericolose.



Figura 1 - Cruscotto di avvio per "myInspection"

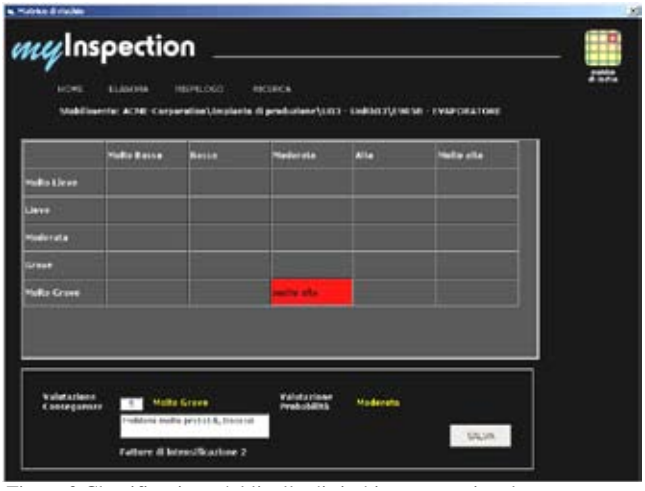


Figura 2 - Classificazione del livello di rischio per una singola attrezzatura

Nell'archivio le attrezzature sono inserite nello stabilimento, organizzato in reparti e unità logiche. L'indice MOND o DOW delle unità, nel caso sia stato calcolato in fase di valutazione del rischio, può essere assegnato direttamente all'unità. Automaticamente l'indice diventa un livello di rischio e può essere ereditato dalle attrezzature contenute all'interno delle unità. Nel caso non sia stato in precedenza calcolato l'indice di rischio, o comunque si voglia fare un analisi più dettagliata dei livelli di rischio "myInspection" permette di costruire una matrice del rischio probabilità conseguenza, personalizzata per ogni attrezzatura. Rispetto ai tipi di matrice noti (API, ASME, MIL, IEC61508, ecc.) c'è piena libertà di scelta, potendosi definire una matrice n per m con la gradazione dei valori più opportuna. Nella figura 2 si riporta una tipica matrice di rischio.

4.2. Quando e Come svolgere le ispezioni (moduli “stabilimento” e “editor”)

In base ai livelli di pericolosità definiti da “myInspection”, il gestore potrà decidere “quando” compiere le ispezioni. Siccome la normativa lascia al gestore una certa libertà, “myInspection” consente di scegliere fra strategia predittiva e strategia preventiva. Il livello di rischio può servire per modulare la frequenza. “myInspection” stabilisce, per le verifiche, una frequenza di ispezione in conformità all’attuale legislazione. Per i controlli, invece, l’intervallo di ispezione fa riferimento alle buone pratiche ed alle indicazioni del costruttore. Una buona pianificazione delle ispezioni deve intensificare i controlli solo sugli elementi classificati con il più alto livello di rischio, e deve rispettare l’intervallo minimo di controllo per oggetti classificati come meno rischiosi. Per questo motivo, la classifica il rischio è tradotto da “myInspection”in una intensificazione di frequenza dei controlli. Ad ogni livello di rischio si associa un fattore di intensificazione. In questo modo la maggiore frequenza di controllo suggerita da “myInspection”, risponde alla seguente equazione.

$$f_{isp} = f_{sugg.} * FI \qquad (1)$$

dove f_{isp} *frequenza ispezione*
$f_{sugg.}$ *frequenza suggerita*
FI *fattore di intensificazione*

Il fattore di intensificazione FI è derivata dalla classificazione del rischio secondo una tabella di conversione, che può essere sintonizzato per configurare il sistema al fine di ottenere gli obiettivi fissati, sempre nel rispetto della norma. Il fattore di intensificazione IF dovrebbe ragionevolmente variare dal 0,5 a 2. In altre parole i controlli sono intensificati rispetto alle indicazioni di costruttori e buone pratiche solo per apparecchi con più alto rischio. Al contrario, la frequenza delle ispezioni può anche essere ridotta per apparecchiature classificate a basso rischio, in modo da concentrare le risorse sulle attrezzature critiche.

Naturalmente per le verifiche c’è meno libertà, così “myInspection”fornisce direttamente la frequenza d’ispezione sulla base delle periodicità fissate dal più volte citato allegato VII. Nella figura 3 si mostra la scheda di un apparecchio con le frequenze di ispezioni calcolate.



Figura 3 - Frequenze d’ispezione (Verifiche) per un’attrezzatura in pressione, come calcolate da “myInspection”.

Stabilito il quando delle ispezioni, bisogna definire cosa occorre misurare. “myInspection”dispone di una funzione di “editor”, che consente di descrivere che cosa va controllato, con quale tecnica e quale tipo di deterioramento si può prevenire in questo modo. Nella figura 4 si mostra una tipica scheda delle misure da svolgere in fase di ispezione.



Figura 4 - Scelta delle misure da compiere durante l'ispezione su una attrezzatura di lavoro. (Nel caso di sollevamento)

4.3. Gestione delle ispezioni (modulo "ispezioni")

Una volta organizzato l'archivio delle attrezzature e definito il livello di rischio associato al singolo elemento (sia esso ereditato dagli indici o ricalcolato con la matrice del rischio) si passa alla gestione del programma di ispezioni.

Le ispezioni sono distinte in controlli e verifiche, secondo la distinzione introdotto al primo capitolo. I controlli sono distinti in periodici e straordinari. I controlli periodici sono programmati. I controlli straordinari vanno svolti ogni volta che intervengano eventi eccezionali (riparazioni, trasformazioni, incidenti, fenomeni naturali o periodi prolungati di inattività).

Per verifiche e controlli vengono memorizzati i dati principali. È inoltre possibile associare una o più immagini in formato JPG. Questa funzione può essere utilizzata per documentare particolari tecniche utilizzate, difetti riscontrati oppure, più semplicemente per allegare una copia del referto cartaceo. È prevista anche la possibilità di gestire guasti e messe fuori servizio. Nella figura 5 si riporta un esempio di scheda ispezione pronta per l'archiviazione.

4.4. Presentazione risultati (modulo "ispezioni")

I risultati dei controlli devono essere inseriti nel DB e tenuti a disposizione, possono essere richiamate per ricostruire la storia ispettiva di un singolo apparecchio, ovvero per verificare l'allineamento rispetto alle scadenze di legge, per dimostrare agli auditor l'adeguatezza dei controlli svolti, per ridefinire i programmi ecc. I vari tipi di ricerca possono essere svolti con le usuali modalità di selezione. Nella figura viene mostrata, come esempio, la scheda delle ispezioni su un serbatoio di gas.

4.5. Personalizzazioni (modulo "database")

"myInspection" è stato pensato per adattarsi agli ambienti più diversi. Inoltre si è tenuto conto della possibile evoluzione sia delle norme tecniche che della legislazione. Per questo motivo le regole sono esterne al software. L'applicazione accede ad un database di regole, che può essere aggiornato dall'utente. È anche prevista la possibilità che l'utente riceva periodicamente degli aggiornamenti delle regole senza dovere apportare modifiche al programma stesso.

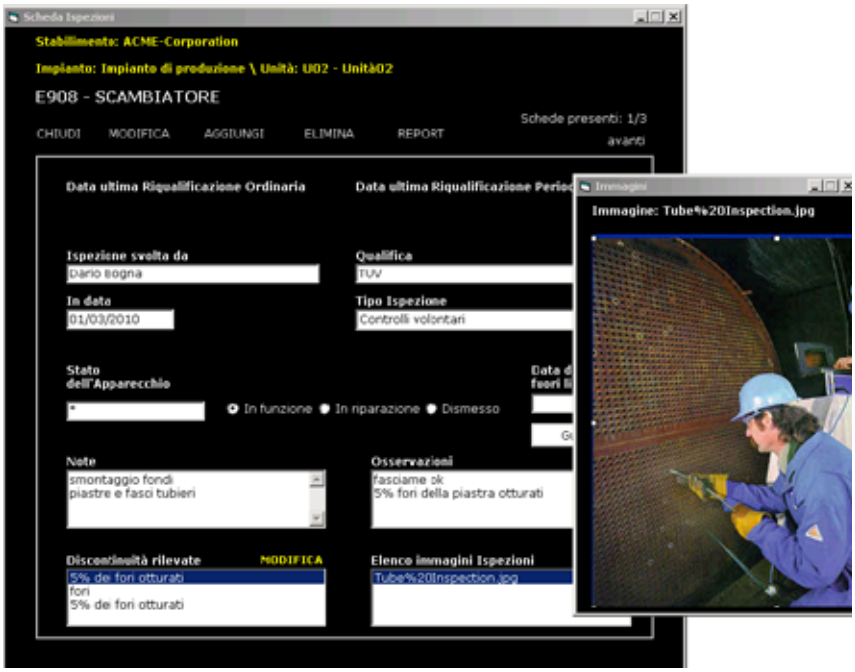


Figura 5 - Scheda ispezione pronta per l'archiviazione. Trattasi di uno scambiatore di calore, con piastra tubiera



Figura 6 - Storia ispettiva di un'attrezzatura di lavoro particolarmente critica.

5. SFORZO TECNOLOGICO

Il sistema "myInspection" è stato volutamente realizzato con tecnologie open-source, usando MySql come database, e con un'architettura Web-Based che permette di accedere al sistema anche tramite Web con la possibilità di consultazione dei dati via palmare.

La scelta della tecnologia open-source rende di più facile divulgazione ed utilizzo gli strumenti software sviluppati poiché può sfruttare alcuni vantaggi e caratteristiche che questa offre.

Dal punto di vista tecnologico i principali software open-source sono sviluppati e mantenuti da comunità virtuali su Internet anche molto numerose, e risultano per questo programmi di

ottima qualità grazie al continuo testing che gli sviluppatori e gli utilizzatori eseguono nel corso del ciclo di vita del prodotto che raggiunge elevati livelli di affidabilità, stabilità, efficienza, flessibilità e sicurezza.

In termini economici, inoltre, il software open-source può essere liberamente utilizzato e distribuito senza alcun costo di licenza o limitazione d'uso in tempo e/o numero di installazioni. Ciò permette, oltre al risparmio sui costi delle licenze, anche la disponibilità di utilizzo a tempo indeterminato.

Riguardo la possibilità di chiedere supporto, il modello di sviluppo collaborativo, che si basa sulla condivisione della conoscenza, rende disponibili su Internet grandi quantità di informazioni accessibili su documentazione sia per lo sviluppo che per l'utilizzo.

6. SPERIMENTAZIONE DI "MYINSPECTION"

Il presente lavoro riporta la sperimentazione del sistema "myInspection" per la gestione dei controlli e delle verifiche delle attrezzature a pressione presenti in uno stabilimento di stoccaggio ed imbottigliamento GPL. Come già detto in altri punti ciò che distingue la gestione delle attrezzature negli stabilimenti Seveso è la necessità di dimostrare ad una commissione di esperti l'adeguatezza dei controlli effettuati per prevenire gli incidenti rilevanti. La maggiore difficoltà pratica nell'uso di "myInspection" è la necessità di organizzare l'archivio delle attrezzature. Nel caso studio, le attrezzature erano già state catalogate in sede di analisi del rischio. Questa era stata svolta utilizzando il software IRIS GPL che aiuta l'utente a sviluppare un esame dettagliato di tutte le attrezzature. Come effetto collaterale di tali analisi vengono passate in rassegna tutti i componenti impiantistici, che nel caso in esame, coincidono con le attrezzature di lavoro. Per informazioni di dettaglio sul software IRIS GPL si rimanda a precedenti lavori degli autori sul tema [10-11] .

7. CONCLUSIONI

Nello sviluppo e nell'applicazione di un sistema di gestione della sicurezza è prevedibile che il gestore incontri delle difficoltà, soprattutto nell'interfaccia fra i contenuti tecnici (che si immaginano in buona parte già presenti) e la struttura formale del sistema di gestione richiesto dal DM 9 agosto 2000. I controlli e le verifiche sulle attrezzature sono uno esempio di contenuto tecnico, di solito già presente, che occorre fare rientrare nell'ambito formale del sistema di gestione. L'organizzazione, la programmazione, l'attuazione e la gestione dei referti sono le attività che devono rientrare nel quadro delle procedure formali e vengono adeguatamente trattate in "myInspection".

Il sistema potrebbe anche essere utilizzato dagli stessi enti di controllo, come strumento di programmazione delle proprie attività. Questo aspetto è interessante perché "myInspection" potrebbe essere uno strumento condiviso, facilitando così il colloquio tra enti di controllo e datori di lavoro.

Il sistema è applicabile in stabilimenti industriali complessi, anche non Seveso, purché si adotti un sistema di gestione (e.g. BS 18001/07 oppure SGSL UNI-INAIL). Di fatto la sola differenza con gli stabilimenti Seveso è che non ci sono le visite ispettive periodiche disposte dall'Autorità Competente. Restano comunque gli altri momenti di verifica, che comprendono gli audit condotti da soggetti indipendenti e la sorveglianza da parte dell'autorità sanitaria.

BIBLIOGRAFIA

[1] Kallen MJ, van Noortwijk JM. Optimal maintenance decisions under imperfect inspection. Reliability Engineering and System Safety 2005; 90(1) 177–85.

[2] Bragatto, P. Pittiglio, P. Ansaldi, S. Management of technical documents for pressure equipments along their lifetime in major accident hazard establishments. (2006) Journal of KONBIN 1(2), pp. 95-102

[3] Bragatto P., Pittiglio P. Geraci D., Pichini E., Inspections on Safety Management Systems and Integrity Controls at "Seveso" Facilities. Safety and Reliability for Managing Risk – Guedes Soares & Zio (eds) © 2006 pp. 1163-1169 Taylor & Francis Group, London

[4] Bragatto P., Pittiglio P., Ansaldi S., Intensification of inspection programs at major hazard establishments. Risk, Reliability and Societal Safety – Aven & Vinnem (eds) © 2007 pp. 1097 – 1102 Taylor & Francis Group, London

[5] Bragatto P.A, Gnoni M.G, Vallerotonda M.R. Optimized planning and scheduling of pressure equipment inspections at comah establishments. Journal of KONBIN 3(6)2008 pp. 128-136

[6] Bragatto, P., Pittiglio, P., Ansaldi, S. The management of mechanical integrity inspections at small-sized "Seveso" facilities. Reliability Engineering and System Safety 2009; 94 (1) 412– 417

[7] UNI 10617:2009 Impianti a rischio incidente rilevante Sistemi di gestione della sicurezza. UNI Milano

[8] BSI British Standards 2007 Occupational Health & Safety Management System Requirements OSHA Series 18001:2007 Bristol UK

[9] Wood M. The mutual joint visit programme on inspections under Seveso II: exchanging lessons learned on inspections best practices. Inst Chem Eng Symp Ser 2005;150:977–94.

[10] Pittiglio, P. Ansaldi, S. Bragatto, P. Agnello, P. Un approccio integrato alla valutazione ed alla gestione della sicurezza nel settore GPL. SAFAP 2008 – Sicurezza ed affidabilità delle attrezzature a pressione Cagliari 2008

[11] Bragatto P. A., Agnello P., Ansaldi S., Pittiglio, P. An integrated system for safety analysis and management in the LPG Industry. Proceedings PSAM9 International Conference on Probabilistic Assessment and Management 18-23 may 2008 Hong Kong.

sessione TEMATICA
ANALISI DEI RISCHI

Periodicità delle verifiche e dei controlli di attrezzature a pressione: riferimenti legislativi e metodologie analitiche

F. Ricci - V. Correggia** - C. Delle Site**
*A. Faragnoli****
*G. Canale*****
**ISPESL - **Ministero dello Sviluppo Economico*
****C-ENGINEERING*
*****Istituto Italiano della Saldatura*

SOMMARIO

Il DM 329/04 prevede, all'art. 10 comma 5, la possibilità di derogare dalle periodicità previste agli allegati A e B del decreto medesimo purchè, con i nuovi intervalli temporali, venga dimostrato un livello di protezione equivalente.

La procedura prevede che venga redatta una relazione tecnica, di cui è responsabile l'Utilizzatore, e che questa relazione venga sottoposta al vaglio del Ministero dello Sviluppo Economico per ottenere l'autorizzazione. I contenuti di questa relazione sono attualmente in discussione presso il CTI, ove si sta mettendo a punto una linea guida che servirà ad orientare le scelte tecniche dell'Utilizzatore.

In questa memoria, oltre a descrivere brevemente i contenuti della bozza in discussione presso il CTI, si procede ad illustrare i riferimenti legislativi attuali e quelli preesistenti dimostrando come il concetto di estensione della periodicità per situazioni a basso rischio fosse in parte previsto nella legislazione antecedente al DM 329/04.

Vengono illustrate inoltre le metodologie più comuni utilizzate nel settore. Tra queste di estrema rilevanza risulta essere la metodologia RBI (Risk-Based Inspection) derivante dalla normativa API 581, di grande utilizzo in campo petrolchimico, ma sempre più utilizzata in altri settori di attività. Caratteristica fondamentale della norma è di prevedere vari livelli di approccio, dal più semplice (qualitativo) al più complesso (quantitativo).

In questa relazione viene individuato un criterio per la valutazione della equivalenza del rischio, nel rispetto di quanto richiesto nel già citato comma 5.

Vengono inoltre ipotizzate possibili applicazioni delle metodologie sopra citate in relazione all'estensione temporale della deroga che si desidera ottenere.

1. L'APPROCCIO RBI NEL CONTESTO DELLA LEGISLAZIONE ITALIANA PER QUANTO ATTIENE LE DEROGHE DALLE VERIFICHE OBBLIGATORIE

Il settore della costruzione dei recipienti a pressione è fortemente disciplinato da decenni non solo in Italia ma in tutti i paesi occidentali.

Disposizioni legislative e codici di costruzione cogenti hanno storicamente limitato gli spazi di creatività disponibili per il Progettista di apparecchi a pressione a differenza, ad esempio, del Progettista di costruzioni civili (ponti, edifici, ecc.).

In ambito comunitario il settore delle costruzioni dei recipienti a pressione è regolamentato dalla cosiddetta direttiva "PED" – Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione. Detta direttiva, come tutte quelle denominate del "Nuovo Approccio" o "Direttive Prodotti" ha

introdotto, irreversibilmente, il concetto di "Requisito essenziale di sicurezza" e di rischio ad esso connesso come base della progettazione di attrezzature ed insiemi a pressione. L'analisi dei rischi costituisce oggi uno dei requisiti nella progettazione di una nuova attrezzatura a pressione.

Gli Stati membri hanno recepito questo approccio nelle diverse leggi e regolamenti nazionali.

In Italia il D.Lgs 93/2000 ha recepito la direttiva 97/23/CE mentre il DM 329/2004 ed il più recente D.Lgs n. 81/2008 così come modificato dal D.Lgs n. 106/2009 hanno regolamentato la messa in servizio e l'utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi. Detti Decreti utilizzano la classificazione PED basata sulle categorie di rischio delle attrezzature a pressione per definire i tipi e gli intervalli delle verifiche periodiche da effettuare nell'esercizio delle suddette attrezzature.

Lo strumento della Risk Based Inspection, finalizzato alla mitigazione del rischio di rilascio di sostanza per perdita di integrità delle pareti di contenimento risulta in particolare coerenza con il principio cui tutti i regolamenti e le leggi dei diversi Stati si sono da sempre ispirati: la sicurezza di esercizio delle apparecchiature dal punto di vista della loro integrità strutturale.

Gli studi RBI si stanno configurando come particolarmente idonei per comprovare livelli di protezione equivalenti nell'utilizzo di periodicità alternative per le ispezioni di legge; essi inoltre rappresentano un criterio oggettivo ed universalmente condiviso che consente di esprimere la valutazione dello stato di conservazione di un componente esercito attraverso la possibilità di valorizzare le ispezioni condotte in precedenza laddove esse risultino "efficaci" nei confronti dei meccanismi di danno attesi sulle attrezzature.

Il Ministero dello Sviluppo Economico ha la responsabilità della concessione, in deroga, di ispezioni alternative e con periodicità differenti da quelle elencate nelle tabelle allegate al DM 329/04 sopra richiamato, ma tali da garantire un livello di protezione equivalente.

Tali deroghe possono essere accettate per casi specifici, nonché per determinate tipologie, fatto salvo quanto previsto nelle istruzioni per l'uso rilasciate dal fabbricante dell'attrezzatura stessa dopo presentazione da parte dell'utente di specifica domanda corredata da un'adeguata relazione tecnica.

Esiste un limite pratico per le frequenze di ispezione, poiché l'affidabilità dei dati di ispezione diminuisce con l'aumentare del tempo trascorso dall'ultima ispezione.

L'estensione di un periodo di ispezione può essere considerato accettabile se le condizioni del servizio sono tali che:

1) la conoscenza dello stato attuale delle apparecchiature e dei gradi di danneggiamento sia sufficientemente affidabile;
2) il danneggiamento di un item sia ragionevolmente prevedibile ad una velocità stimata;
3) esistono mezzi ovvero metodi affidabili per determinare possibili variazioni operative ambientali che possano portare ad un aumento del Rischio.

Queste condizioni sono ben contemplate nelle analisi RBI e pertanto, un'analisi che si basi sul principio del RBI, costituisce una presunzione di garanzia ai fini della concessione della deroga, alle verifiche periodiche richiamate nel DM 329/04 prima citato.

Come descritto nel seguito del presente lavoro occorre innanzitutto valutare l'approccio più idoneo per la deroga tenendo conto della tipologia di verifica (integrità o funzionamento) avendo queste tipologie un carattere sostanzialmente diverso sia in termini di modalità di ispezione che di periodicità.

Allo stesso modo occorre tenere in considerazione l'estensione dell'intervallo temporale richiesto nella deroga medesima, all'aumentare del quale dovrà essere applicata una metodologia progressivamente più rigorosa per evidenti considerazioni di sicurezza..

2. LA LEGISLAZIONE PREVIGENTE

Il R.D. 12 maggio 1927 n°824 ed il successivo D.M. 21 maggio 1974 introducevano l'istituto dell'esonero mediante il quale era possibile esonerare in maniera parziale o totale da alcune prescrizioni relative alle fasi di costruzione e di utilizzazione.

Il concetto dell'esonero era implicitamente connesso a quello del rischio intrinseco dell'attrezzatura a pressione: nel caso di apparecchio e/o componente a basso rischio è possibile limitare le

prove, ridurre i dispositivi di sicurezza/controllo e i controlli/supervisione in sede di utilizzazione.

L'istituto dell'esonero comprendeva vari aspetti connessi alla costruzione ed all'esercizio dell'attrezzatura a pressione; tuttavia, include al suo interno anche la possibilità di modificare la periodicità di alcune verifiche. In particolare con l'art. 51 si dava la possibilità, per impianti a ciclo continuo, di concedere l'esonero dall'esame annuale dell'efficienza delle valvole di sicurezza subordinando tale richiesta ad alcune condizioni particolari inerenti, ad esempio, la natura del fluido, l'affidabilità dei dispositivi, la funzionalità dei sistemi di regolazione.

Con il D.M. 329/04 si è definitivamente introdotto, in maniera esplicita, il concetto di "deroga" in accordo a valutazioni di rischio, estendendo il concetto che nella normativa precedente era stato introdotto limitatamente a casi specifici.

Un altro esempio di possibilità di modificare la periodicità di ispezione è contenuta nella Circolare ISPESL 48/2003 sullo scorrimento viscoso. In essa si prevede la possibilità, per impianti a ciclo continuo, di concedere il "NULLA OSTA" all'ulteriore esercizio temporaneo fino alla prima scadenza per visita interna rispetto alle scadenze temporali previste dalla circolare medesima (100000 ore per il primo controllo e 50000 ore (valore massimo) per i controlli successivi). In questo caso la "deroga" è subordinata ad una frazione di vita consumata inferiore al 60% della vita teorica totale ovvero qualora sia stata verificata l'esistenza di un basso livello di rischio connesso all'attrezzatura.

3. LA METODICA RBI

La metodica RBI costituisce da molti anni un riferimento irrinunciabile per i Gestori degli impianti industriali che hanno l'esigenza di garantirne l'esercizio in condizioni di sicurezza nei confronti dei rischi di incidente rilevante. Tra i riferimenti normativi è sicuramente possibile citare gli standard API RP 580 e API RP 581 (quest'ultima è la raccomandazione applicativa), soprattutto nell'ultima edizione (Settembre 2008) che costituiscono uno strumento completo ed esaustivo per l'implementazione della metodica, venendo a coprire molti settori industriali che un tempo erano praticamente esclusi come il settore della generazione di energia ed il settore chimico e petrolchimico. Fra i molteplici fattori che incidono sulla sicurezza di esercizio degli impianti, la perdita di integrità dei componenti a pressione appartenenti all'impianto costituisce, senza dubbio, la più seria minaccia, avendo come conseguenza il rilascio di un fluido che può comportare danni alle persone e all'ambiente, oltre che un danno economico dovuto al mancato funzionamento dell'impianto e alle necessità di ripristino della sua funzionalità. Per questi scopi i Gestori degli impianti stabiliscono dei protocolli di controllo periodico dei loro componenti per limitare la frequenza dei guasti dovuti a perdita di integrità delle pareti di contenimento delle membrature a pressione e adottano misure atte, nel contempo, a limitare le conseguenze di un eventuale rilascio. La definizione delle priorità di intervento è evidentemente uno dei fattori fondamentali nella programmazione degli interventi ispettivi. Una programmazione ottimale deve infatti consentire di indirizzare le risorse economiche dedicate all'ispezione ed al controllo verso i componenti che più di altri richiedono tali interventi.

Nei decenni passati il criterio più diffuso per la programmazione delle ispezioni era basato su prassi che prevedevano ispezioni dei componenti con periodicità regolari, in funzione delle loro caratteristiche e del tipo di servizio. Tali prassi non consentono di adattare il piano ispettivo alle esigenze del singolo componente e, spesso, le risorse ispettive vengono applicate laddove non sono strettamente necessarie mentre, viceversa, non vengono individuati i componenti che richiedono interventi ispettivi urgenti e particolarmente approfonditi.

A differenza di questo approccio la Risk Based Inspection consente di definire tali priorità anteponendo alla pianificazione delle ispezioni una analisi dei rischi di rilascio connessi al singolo componente.

Un'analisi RBI viene generalmente applicata ad un impianto industriale o ad un'unità di impianto e cioè ad un insieme di recipienti e tubazioni (item) che fanno parte di una unità produttiva destinata alla produzione di uno specifico prodotto, utilizzando un determinato processo termico, chimico, ecc. L'analisi si pone l'obiettivo di elaborare delle strategie di ispezione e controllo che consentano di mantenere il livello di rischio di ciascun item dell'unità di appartenenza entro un limite accettabile. L'evento considerato è il rilascio di sostanza per perdita di integrità delle pareti di contenimento.

La valutazione del livello di rischio è "personalizzata", cioè connessa ad ogni singolo componente (apparecchiatura o linea) appartenente all'impianto. Sono generalmente oggetto delle analisi RBI i soli componenti a pressione statici (quali serbatoi a pressione, scambiatori, reattori, ecc.), essendo i motori, le pompe, i compressori, ecc., oggetto di avarie differenti dalla perdita di integrità delle pareti a pressione.

Il rischio di rilascio viene valutato "combinando" fra loro i due attributi che caratterizzano il rischio inteso in senso ingegneristico, e più precisamente la probabilità di accadimento di un evento di rilascio e la magnitudo delle conseguenze ad esso associate.

L'analisi RBI ha inizio a partire dai dati disponibili in impianto ed in particolare facendo riferimento, in via preliminare, alle informazioni e ai dati desumibili da:

- Manuale operativo dell'impianto
- Rapporto di sicurezza
- Bilanci di materia e termici
- Data sheet e disegni costruttivi delle attrezzature
- Elenchi e specifiche di linea
- Process & Instruments Diagram (PID)
- Schemi di layout
- Specifiche materiali per apparecchiature e linee
- Specifiche del sistema di rilevazione ed allarme gas ed incendio
- Specifiche dei sistemi antincendio e di mitigazione dei rilasci

3.3. Studio del processo, meccanismi di danneggiamento, efficacia dei controlli

L'analisi si compone di una prima fase di studio del processo e dei meccanismi potenziali di danneggiamento (conseguenti all'interazione fra il prodotto/processo ed il materiale costituente i componenti) a cui sono sottoposti i diversi item

3.3.1. Meccanismi di danno

Nell'analisi vengono considerati, in generale, tutti i meccanismi di danno fondamentali (Figura 1).

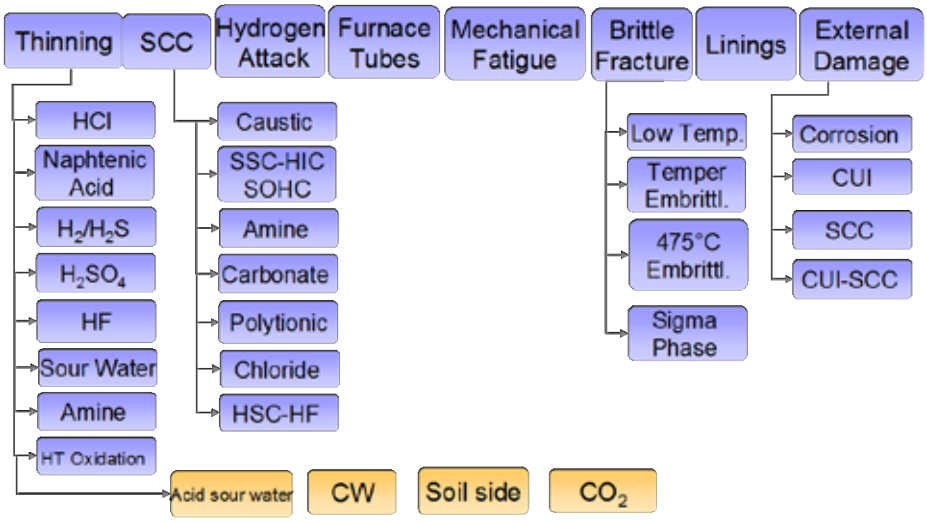


Figura 1 – Meccanismi di danno

Successivamente viene valutata la severità del danneggiamento attraverso alcuni parametri descrittivi (rateo di corrosione, suscettibilità qualitativa ad un particolare fenomeno di degrado). La valutazione può essere condotta mediante modelli di calcolo a partire da alcune informazioni relative alla composizione del fluido corrosivo, alle condizioni di esercizio e alle caratteristiche dei materiali; oppure, se disponibili, mediante dati misurati, o mediante esperienza acquisita su sistemi similari.

In questa fase vengono utilizzati i dati disponibili su:

- Dati di progetto dei componenti
- Storico ispettivo/manutentivo (schede di ispezione e interventi di manutenzione)

3.3.2. Efficacia dei controlli

La valutazione dell'efficacia delle ispezioni condotte è necessaria per attribuire un grado di confidenza ai parametri relativi alla severità del danneggiamento

Vengono considerati numerosi metodi di controllo ed ispezione (anche particolarmente avanzati) e per ciascuno, in relazione al meccanismo di danno da rilevare, è indicata l'efficacia (con riferimento alla tecnica più idonea ed all'estensione più opportuna), suddividendola in cinque categorie:

- Altamente efficaci: in grado di individuare il danno nel 90% dei casi.
- Usualmente efficaci: in grado di individuare il danno nel 70% dei casi.
- Scarsamente efficaci: in grado di individuare il danno nel 50% dei casi.
- Poco efficaci: in grado di individuare il danno nel 40% dei casi.
- Inefficace: non in grado di individuare il danno correttamente.

3.4. Valutazione della probabilità e della conseguenza

3.4.1. Calcolo della probabilità di avaria

La valutazione della probabilità è condotta con riferimento ad una frequenza media annua di accadimento dell'evento.

La frequenza (probabilità) attesa dell'evento viene calcolata come prodotto di una frequenza generica individuata per tipologia di apparecchio e di perdita (assimilata ad un foro di varie dimensioni, detto "scenario"), per un fattore di modifica che considera le particolari condizioni di servizio dell'apparecchio e del sito dell'impianto, e per un ulteriore fattore che dipende da una valutazione dell'efficienza del sistema di gestione dell'impianto. In figura 2, si riporta una schema esemplificativo.

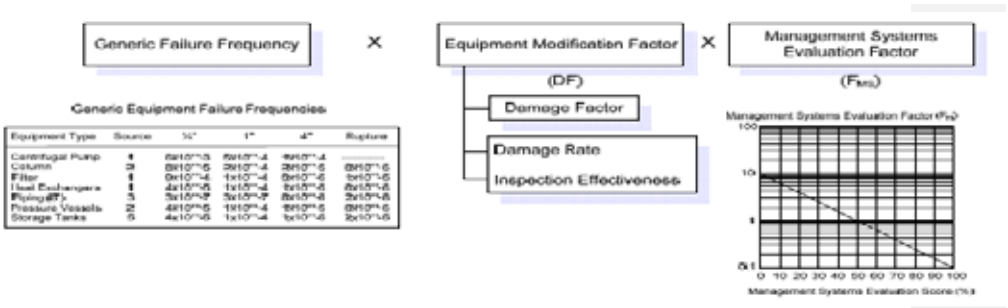


Figura 2 – Calcolo della frequenza attesa dell'evento

Pertanto la probabilità di avaria viene valutata mediante l'equazione (1):

$$P_f = P_{fg} \times D_f \times F_{mf} \qquad (1)$$

dove:

- P_{fg} è una frequenza generica di accadimento che viene corretta tramite due fattori di correzione:

- D_f è il damage factor che tiene conto dei meccanismi di danneggiamento attesi viene applicato con il suo valore ad ogni singolo componente;
- F_{mf} è il management system factor che tiene conto dell'affidabilità del sistema di gestione e viene applicato con lo stesso valore a tutti i componenti dello stesso impianto.

3.4.2. Calcolo della conseguenza di avaria

L'analisi prosegue con la valutazione dei fattori che hanno influenza sulla "magnitudo" delle conseguenze di un rilascio:

- infiammabilità/esplosività e stato fisico del fluido
- dimensioni dei gruppi di "inventory"
- efficacia dei sistemi di rilevazione/isolamento/estinzione
- area geografica ed ubicazione dell'impianto, ecc.

3.5. Valutazione del rischio e matrice di rischio

Una volta quantificate le probabilità e le conseguenze, per ciascun item viene calcolato, attraverso il prodotto, il valore del rischio allo stato corrente, cioè nel momento in cui viene condotta l'analisi. In aggiunta può essere utilizzata la rappresentazione qualitativa mediante matrice di rischio:

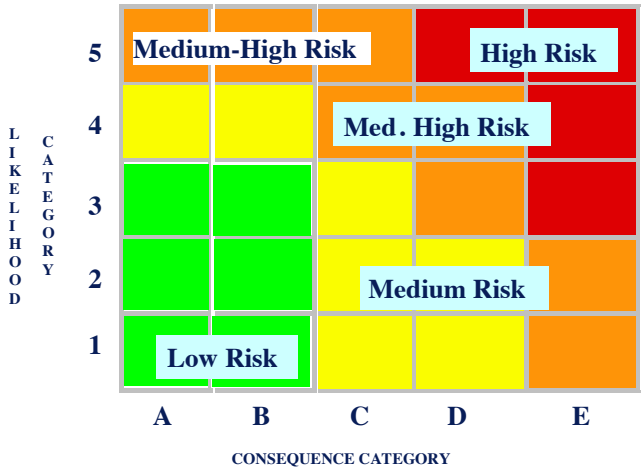


Figura 3 – Matrice di rischio

Nella matrice di rischio le aree a diverso livello di rischio (ALTO, MEDIO-ALTO, MEDIO, BASSO) sono caratterizzate da colori differenti. Tutti gli item dell'unità analizzata vengono posizionati sulla matrice di rischio.

3.6. La variabile tempo e le proiezioni di rischio

Il tempo è una delle variabili principali nella definizione della probabilità di accadimento. La probabilità, infatti, se tutte le altre condizioni rimangono inalterate, aumenta inesorabilmente con il trascorrere del tempo. Pertanto, oltre che la rappresentazione allo stato corrente, è possibile ottenere le rappresentazioni del livello di rischio di ciascun item anche per orizzonti temporali predefiniti. È possibile, quindi, effettuare le cosiddette proiezioni di rischio e valutare il livello di rischio che sarà raggiunto da un determinato item dopo un tempo stabilito.

È bene precisare che le proiezioni di rischio non sono mere estrapolazioni probabilistiche ma sono basate sulla evoluzione dei meccanismi progressivi di danneggiamento, così come sono stati identificati e caratterizzati durante lo studio dell'impianto. Se ad esempio lo studio ha portato a determinare, per un certo componente, l'esistenza del meccanismo di danneggia-

mento “corrosione generalizzata” e a stabilire un certo “rateo” di decremento dello spessore, nella proiezione questo rateo viene applicato fino alla data richiesta per la proiezione. In maniera analoga si agisce per tutti gli altri meccanismi di danneggiamento identificati.

Esiste una differenza fondamentale fra la situazione allo stato corrente e la situazione prevista tramite una proiezione futura del rischio:

- lo stato corrente è definito da una serie di parametri e fattori che riguardano il passato dell’unità e pertanto il **livello di rischio allo stato corrente non è più modificabile**;
- la situazione prevista nel futuro tramite una proiezione di rischio dipende invece dal tipo di misure che possono essere adottate nel frattempo; pertanto il **livello di rischio previsto per un certo orizzonte temporale può essere modificato o, più correttamente, “mitigato”**.

Fra i fattori che consentono di mitigare il livello di rischio, senza dubbio le attività ispettive ed i controlli giocano il ruolo preponderante.

L’approccio può variare da quello più semplice (qualitativo) a quello più complesso (quantitativo).

3.7. Considerazioni sull’utilizzo della metodica RBI

La Risk Based Inspection è uno strumento di gestione. La sua applicazione deve risultare di aiuto nelle fasi decisionali inerenti la programmazione delle attività ispettive (periodicità, tipologia, estensione delle ispezioni); inoltre, sebbene non autosufficiente, l’applicazione delle metodiche RBI può essere importante per supportare il processo decisionale relativo alla programmazione delle fermate degli impianti, se utilizzata in concomitanza con altri strumenti gestionali quali ad esempio la RCM (Reliability Centered Maintenance).

Le analisi di tipo qualitativo hanno il grande vantaggio di costituire comunque un valido orientamento anche in presenza di dati incerti e poco precisi sulla storia operativa dei componenti, in presenza di informazioni relative alla storia ispettiva scarse o spesso assenti. In tali condizioni risulta comunque possibile posizionare i componenti in una classifica di rischio decrescente, individuare gli item a rischio “relativamente” più elevato e concentrare su di essi il budget previsto per le ispezioni. In un’analisi di tipo qualitativo, inoltre, il valore di rischio accettabile non deve essere definito in modo “oggettivo” ma viene individuato all’interno dell’organizzazione del Gestore sulla base, di solito, di considerazioni di carattere economico.

Le analisi di tipo quantitativo risultano invece indispensabili laddove esista una esigenza di confronto ed allineamento con analisi dei rischi effettuate in altri ambiti (ad es. rapporti di sicurezza) e, in special modo, quando occorrono riferimenti “oggettivi” per la definizione di un valore di rischio accettabile.

4. PROGETTO DI NORMA UNI TS 11325-8: PIANIFICAZIONE DELLE ISPEZIONI SU ATTREZZATURE A PRESSIONE ATTRAVERSO METODOLOGIE BASATE SULLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO (RBI)

Il CTI-UNI, considerata l’importanza che sta rivestendo l’applicazione della metodologia Risk Based Inspection (RBI) e la necessità di una corretta applicazione della stessa, ha creato un Gruppo di Lavoro ad hoc per questa tematica.

E più precisamente, nell’ambito del Gruppo Di Lavoro GL04 “Integrità strutturale delle attrezzature a pressione”, che ha il compito di elaborare proposte di “Norme nazionali”, “Raccomandazioni” o “Specifiche Tecniche” relative a criteri tecnici di valutazione dell’integrità strutturale degli apparecchi a pressione e dipubbliche su normative nazionali ed internazionali di argomenti similari, è stato creato il Sotto-Gruppo SG03 “Risk Based Inspection”.

Il Sotto-Gruppo in questione si pone come obiettivo l’elaborazione di un nuovo progetto di Norma UNI TS 11325-8 sul Risk Based Inspection,: “Pianificazione delle ispezioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI)”.

Il presente progetto di norma fornisce i principi generali, le linee guida, le indicazioni e i requisiti di base per l’elaborazione di procedure mirate ad una efficace ed efficiente pianificazione ed attuazione delle periodicità delle ispezioni, controlli, verifiche di integrità strutturale e di funzionamento delle attrezzature/insiemi, basata sulla metodologia RBI.

L'utilizzo della metodologia RBI ai fini di una nuova definizione degli intervalli di ispezione, così come riporta il comma 5 dell'art. 10 del D.M. 329/04, può essere molto utile per dimostrare che possono esistere livelli di rischio equivalenti in funzione di differenti intervalli ispettivi.

In casi caratterizzati da una dimostrabile eccezionalità, si possono effettuare studi che siano di supporto all'elaborazione di adeguata "Relazione Tecnica", come riportato nello stesso comma del D.M. 329/04, ai fini di una richiesta di deroga agli intervalli di ispezioni imposti per legge.

5. CRITERIO DI EQUIVALENZA DEL RISCHIO

Il comma 5 dell'art. 10 del D.M. 329/04 concede la possibilità di adottare periodicità differenti, da quelle elencate nelle tabelle di cui agli allegati A e B, nel caso:

- tali periodicità garantiscano un livello di protezione equivalente;
- siano relative a casi specifici;
- siano relative a determinate tipologie di attrezzature;
- non siano in contrasto con le istruzioni per l'uso rilasciate dal fabbricante;
- siano dedotte da uno studio adeguato contenuto in una Relazione Tecnica.

Per il soddisfacimento del primo punto è pertanto necessario verificare che, per una determinata attrezzatura, adottando la nuova periodicità di ispezione, il livello di protezione ad ogni istante temporale t sia equivalente, o non superiore, a quello che si avrebbe adottando la periodicità di ispezione corrispondente al criterio definito negli allegati A e B del DM329/04.

I criteri di protezione equivalente, sono ovviamente strettamente correlati al concetto di rischio. Al momento il CTI, nel gruppo di lavoro prima descritto, sta lavorando per definire meglio questi criteri di equivalenza, in relazione al metodo di valutazione utilizzato. È evidente infatti che se si utilizza un metodo quantitativo il confronto debba essere fatto in termini numerici, mentre se si utilizza un metodo qualitativo esso debba essere fatto in termini qualitativi (utilizzando ad esempio un confronto tra categorie di rischio invece che tra livelli assoluti di rischio).

Condizione necessaria per la deroga è, in ogni caso, l'assenza di riscontri negativi di precedenti verifiche ispettive, indagini varie o prove non distruttive che evidenzino una qualche criticità per la stabilità delle membrature.

6. APPLICAZIONI DELLE METODOLOGIE IN RELAZIONE ALL'ESTENSIONE TEMPORALE ED ALLA TIPOLOGIA DI VERIFICA

Come già detto, occorre innanzitutto valutare l'approccio più idoneo per la deroga tenendo conto della tipologia di verifica (integrità o funzionamento) avendo queste tipologie un carattere sostanzialmente diverso sia in termini di modalità di ispezione che di periodicità. Occorre, anche, tenere in considerazione l'estensione dell'intervallo temporale richiesto nella deroga medesima, all'aumentare del quale dovrà essere applicata una metodologia progressivamente più rigorosa per evidenti considerazioni di sicurezza.

Gli esoneri avuti grazie all'applicazione della Raccolta E dell'ISPESL rappresentano un buon punto di partenza e un'ottima base statistica al fine delle richieste di deroghe in materia di attrezzature a pressione.

La richiesta di deroga deve essere accompagnata da motivazioni che attestino l'***eccezionalità*** e la ***necessità*** della richiesta di deroga stessa.

Si propone di seguito un possibile schema di riferimento per individuare le metodologie più idonee in relazione all'estensione temporale della deroga che si vuole ottenere ed alla tipologia di verifica(Figura 4).

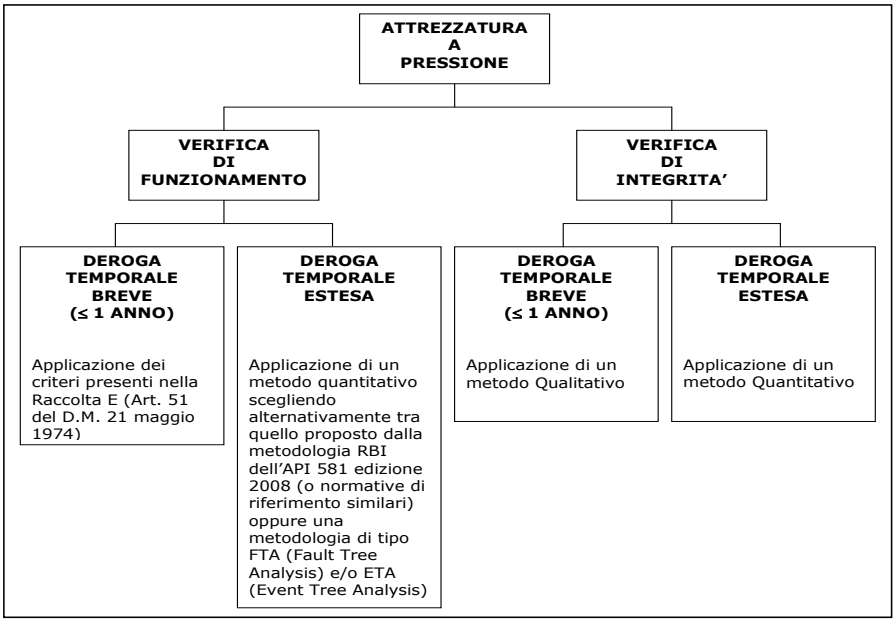


Figura 4 – Flow Chart Applicazioni – Criteri minimi

Come evidenziato dalla figura 4, potrebbe essere sufficiente rifarsi ai criteri di comprovata affidabilità presenti nella Raccolta E (art. 51 del Decreto Ministeriale 21 maggio 1974) per ciò che concerne deroghe temporali brevi (ad esempio di durata non superiore ad un anno) applicabili alle verifiche di funzionamento di cui all'art. 13 del D.M. 329/04.

Al contrario per le stesse verifiche di funzionamento, nel caso di deroghe più estese, occorrerebbe riferirsi ad un metodo quantitativo scegliendo alternativamente tra quello proposto dalla metodologia RBI dell'API 581 edizione 2008 (o normative di riferimento similari) oppure una metodologia di tipo FTA (Fault Tree Analysis) e/o ETA (Event Tree Analysis). Infatti, la frequenza di accadimento dell'evento "sovrappressione" valvola di sicurezza, ai due diversi orizzonti temporali, deve essere confrontabile e dimostrare un non incremento del livello di rischio.

Per quanto riguarda, invece, la verifica di integrità occorrerebbe riferirsi ad un metodo almeno di tipo qualitativo per deroghe temporali brevi e di tipo quantitativo per deroghe temporali estese (ad esempio di durata superiore ad un anno).

Quanto appena prospettato non ha carattere di obbligatorietà nei confronti dell'utilizzatore che esegue l'analisi ma vuole essere un supporto a come procedere ai fini dell'elaborazione della Relazione Tecnica, ai fini della Richiesta di Deroga, prevista dal comma 5 del citato Decreto Ministeriale. Ciò è anche supportato dall'esperienza in campo degli addetti ai lavori.

È evidente, infine, che metodologie più restrittive rispetto a quelle prospettate in figura 4 possono essere impiegate qualora ritenute più idonee al caso specifico.

7. CONCLUSIONI

All'interno dell'articolo si è voluto evidenziare l'introduzione implicita della metodologia RBI all'interno della vigente legislazione nazionale. Infatti, l'art. 10 comma 5 del D.M. 329/04 oltre a richiamare un livello di protezione equivalente introduce il concetto di metodologie di ispezione alternative in cui è lecito annoverare la metodologia RBI.

Nell'introdurre però la metodologia in questione non evidenzia esattamente i limiti entro cui è possibile applicarla lasciando sul vago il confine dell'applicabilità.

Ragion per cui in ambito CTI si è sentita l'esigenza di sviluppare delle linee guida e quindi

dare vita ad un progetto di norma UNI TS 11325-8 che funga da supporto a coloro che, dimostrati i presupposti di eccezionalità, decidano di sviluppare una richiesta di deroga usufruendo di un approccio RBI.

In particolare, in questa relazione viene individuato un criterio per la valutazione della equivalenza del rischio, nel rispetto di quanto richiesto nel già citato comma 5.

Vengono inoltre ipotizzate possibili applicazioni delle metodologie sopra citate in relazione all'estensione temporale della deroga che si desidera ottenere.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] A. Faragnoli, C. Delle Site, S. Dominici "Applicazione RBI ad un impianto industriale: considerazioni tecniche e risvolti legislativi" 13° Congresso dell'AIPnD, Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive – Monitoraggio e Diagnostica, 15-16-17 Ottobre 2009

[2] A. Faragnoli, A. Fiorilla "Applicazione del comma 5 dell'art. 10 del D.M. 329/04. Definizione delle periodicità d'ispezione di attrezzature a pressione. Case Studies". Atti del convegno SAFAP 2008, Cagliari 12-13 Giugno 2008

[3] C. Delle Site, A. Faragnoli "Programmazione delle ispezioni in funzione del rischio. Esempi applicativi relativi ad attrezzature a pressione.", Atti del 12° Congresso dell'AIPnD, Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive – Monitoraggio e Diagnostica, 11-12-13 Ottobre 2007.

[4] G. Augugliaro, C. Delle Site, C. Mennuti, A. Faragnoli "Valutazione dei meccanismi di danno in un reattore di un impianto petrolchimico", Atti della Giornata Nazionale sulla Corrosione e Protezione, 20-22 Giugno 2007, Messina.

[5] C. Delle Site "Moderne tecniche di analisi per la valutazione dello stato di integrità delle attrezzature a pressione" Atti del Convegno ISPESL, Vibo Valentia, 2003

[6] Risk Based Inspection -, API Pubblication 580.

[7] Risk Based Inspection - Base resource Document , API Pubblication 581, may 2000

[7] "Best Practice for Risk Based Inspection as a part of Plant Integrity Management", HSE CONTRACT RESEARCH REPORT 363/2001 (HSE Book)

[8] "Risk Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry (RIMAP)" CEN WORKSHOP AGREEMENT CWA 15740 Aprile 2008.

[9] A. Lauro, S. Pinca "Ispezione Basata sul Rischio" Convegno SAFAP 2004, Roma 10-11 giugno 2004

[10] Ricerca ISPESL: "Incidenti ed avarie. Linee guida per la valutazione attraverso criteri di meccanica della frattura" –5 aprile 2001, Firenze

[11] Atti del "API RBI WORKSHOP", Milano Aprile 2008

[12] Ricerca ISPESL: "Incidenti ed avarie. Linee guida per la valutazione attraverso criteri di meccanica della frattura" –5 aprile 2001, Firenze

Criterio per la valutazione di criticità delle macchine nel settore Oil&Gas

D. Nevoso* - A. Scaglione** - P. Chiantella***

** Ingegneria di Manutenzione Raffineria di Milazzo S.C.p.A.*
*** Responsabile Ingegneria di Manutenzione Raffineria di Milazzo S.C.p.A.*
**** Responsabile Manutenzione Raffineria di Milazzo S.C.p.A.*

1. SOMMARIO

La realtà industriale di una raffineria risulta molto complessa e diversificata per servizi e tipologia di apparecchiature installate.

In particolare le macchine, cuore nevralgico del funzionamento degli impianti, rappresentano ampia parte delle apparecchiature in esercizio e si dividono in una vasta gamma per tipologia e tipo di applicazione.

In un contesto così complesso risulta importante conoscere le specificità delle varie macchine in esercizio nei diversi impianti in modo da definire la criticità di ogni item al fine di ottimizzarne l' affidabilità meccanica e implementarne la sicurezza.

Infatti oltre a garantire i margini di produzione richiesti dal contesto economico in cui una Raffineria opera è necessario contemporaneamente salvaguardare la sicurezza per gli asset e ovviamente per il personale d'impianto interessato alla conduzione degli stessi.

2. TIPOLOGIA MACCHINE RAM

Per poter condurre una valutazione di rischio adeguata si rende necessario conoscere le peculiarità tecniche delle macchine da prendere in esame.



Figura 1. Database macchine RAM

A tal fine in RAM è stato implementato un database macchine contenente per ogni item le principali e più significative caratteristiche tecniche e costruttive relative ai componenti di un treno macchina : macchina motrice (motore elettrico o turbina), macchina intermedia (riduttore/moltiplicatore), e macchina che rappresenta l'utenza finale (pompa, compressore).

Nel database sono inoltre contenute informazioni relative al tipo di servizio svolto dall'item come fluido di processo, temperatura di esercizio, pressioni, ecc.

A valle di tale "censimento" è stata identificata la popolazione macchine della Raffineria di Milazzo che risulta composta da circa 1014 treni macchina a cui vanno sommati circa 297 Aircolers e 100 pompe di lubrificazione.

In particolare sul totale dei treni macchina, 878 sono costituiti da pompe (trascinate da motore elettrico o turbina a vapore) e 58 da compressori (alternativi e centrifughi) .

Nella tabella seguente viene riassunto il dettaglio della suddivisione delle macchine per "macrotipologia":

Parco macchine RAM	
Tipologia di macchina	**Quantità**
Pompe di processo (centrifughe, alternative, a vite, ecc.)	878
Compressori	58
Agitatori	16
Ventilatori	55
Contattori (reattori imp.Alchilazione)	3
Turbogeneratore a vapore	2
Turbogeneratore a gas	1
Aircooler	297
Pompe lube	100

Tabella 1. Dettaglio parco macchine RAM

Partendo dalle informazioni contenute nel database e tenendo conto delle evidenze di esercizio è stato studiato un metodo per assegnare un valore di rischio a ciascun item al fine di identificare quali sono le macchine su cui incentrare una politica manutentiva finalizzata all'aumento di affidabilità e di sicurezza.

3. MATRICE DI RISCHIO

Il metodo scelto per classificare le macchine della Raffineria di Milazzo è basato su una matrice di rischio. Le colonne di tale matrice rappresentano i criteri di rischio ritenuti più idonei ad essere applicati alla realtà della Raffineria, cioè quei parametri che tengono conto dei vari aspetti che riguardano a livello generale il servizio che la macchina svolge:

1. Sicurezza
2. Produttività
3. Impatto ambientale
4. Installazione (tipologia di pompa)

Le righe della matrice tengono invece conto di quanto alto è il grado di rischio,relativamente ad ognuno dei criteri di cui sopra.

Sono stati individuati tre gradi di criticità per ogni criterio in funzione del fluido processato per quanto riguarda la sicurezza, degli effetti della fermata di una macchina per quanto riguarda la produttività, delle conseguenze relative alle perdite di prodotto per quanto concerne l'impatto ambientale ed in fine della tipologia di pompa per quanto riguarda l'installazione.

I quattro criteri individuati cercano di inquadrare in maniera completa lo scenario relativo alla macchina presa in esame in quanto oltre che a prendere in considerazione aspetti tecnici (tipo di macchina) tengono conto anche di fattori di tipo gestionale (sicurezza, impatto ambientale, effetti sulla produzione di un eventuale fermo macchina).

Sul fronte sicurezza si è voluto dare particolare peso a tutte quelle macchine il cui servizio prevede fluidi con temperatura di infiammabilità minore rispetto alla temperatura di eserci-

zio (grado di criticità 3). In questi casi infatti un eventuale sversamento di prodotto sarebbe con alta probabilità causa di incendio venendosi a creare la contemporanea presenza dei tre elemneti della combustione: combustibile (fluido di processo), comburente (aria) e innesco (temperatura).

Altrettanto critiche per la sicurezza sono da considerarsi la pompe del GPL o di benzine leggere per via del rischio di nube gassosa conseguente ad una perdita di prodotto.

Per quanto riguarda il criterio "produttività" sono state inquadrate nel livello di criticità più alto quelle macchine la cui fermata comporta il fermo dell'impianto di produzione, mentre come impatto ambientale più significativo è stato scelto quello che coinvolge non solo l'impianto in cui si manifesta il problema ma anche assets che si trovano oltre il limite batteria.

Infine evidenze manutentive e di esercizio hanno portato a ritenere maggiormente critiche da un punto di vista costruttivo le pompe verticali con Barrel.

L'applicazione della matrice di rischio prevede l'assegnazione per ogni macchina di un grado di criticità (righe della matrice) per ogni criterio (colonne della matrice). La sommatoria dei 4 gradi di criticità così ottenuti fornisce un indice di criticità relativo all'item preso in considerazione.

Così ad esempio se una pompa ha grado di criticità 3 per il criterio di sicurezza, grado di criticità 2 per la produttività, grado di criticità 3 per l'impatto ambientale e grado di criticità 3 per l'installazione il relativo indice di criticità risulterà essere 11 (3+2+3+3=11).

Applicando questo principio di classificazione le macchine installate in RAM sono state suddivise in tre Categorie di criticità:

Fascia Bassa: IC 4÷7

Fascia Media : IC 8÷9

Fascia Alta : 10÷12

Classificazione macchine critiche

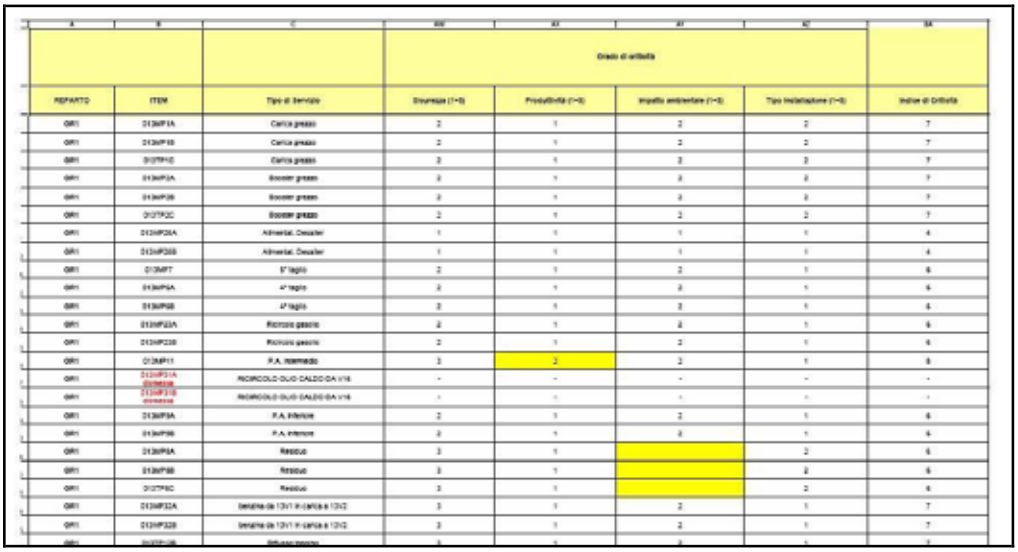
Criteri		1. Sicurezza	2. Produttività	3. Impatto ambientale	4. Installazione	Indice di criticità IC	Categoria di criticità
Grado di criticità	3	GPL/ Benzine leggere Tinf < Tes	fermata impianto di produzione	nuvola di gas con raggio d'influenza esterna al limite di batteria dell'impianto	pompe verticali con barrel		Alta IC 10-12
	2	Gasolio,prodotti pesante, fluidi pericolosi no HC	notevole perdita di produzione/cambio d'assetto dell'impianto	sversamento di prodotto irritante per pelle , occhi e mucose e/o con effetti nocivi se inalato , sversamento di benzina o gasolio	pompe a doppio supporto/compressori		Media IC 8-9
	1	prodotti non infiammabili	nessuna conseguenza	Nessun/ridotto impatto ambientale	pompe a vite/pompe a sbalzo/altro		Bassa IC 4-7
ITEM		Grado di criticità ITEM [Ci]					
pompa 1		3	2	3	3	11.00	
compressore 2		3	3	3	2	11.00	
turbina 3		1	1	1	3	6.00	
.....		...	...	...	...	...	
.....		...	...	...	...	...	

$$IC = \sum_{i=1}^{n} C_i$$

n= numero di criteri
Ci = grado di criticità specifico dell'item relativo al criterio

Figura 2. Matrice di rischio RAM per la classificazione delle macchine

Per ciascun reparto e per ciascun impianto è stato quindi elaborato un elenco di macchine critiche avvalorato e supportato anche dalle esperienze dirette dei capi reparto su quelle che sono le criticità delle varie macchine esercite nei loro impianti.



A	B	C	AW	AX	AY	AZ	BA
			Grado di criticità				
REPARTO	ITEM	Tipo di Servizio	Sicurezza (1÷5)	Produttività (1÷5)	Impatto ambientale (1÷5)	Tipo Installazione (1÷5)	Indice di Criticità
GR1	013MP1A	Carica grezzo	2	1	2	2	7
GR1	013MP1B	Carica grezzo	2	1	2	2	7
GR1	013TP1C	Carica grezzo	2	1	2	2	7
GR1	013MP2A	Scooter grezzo	2	1	2	2	7
GR1	013MP2B	Scooter grezzo	2	1	2	2	7
GR1	013TP2C	Scooter grezzo	2	1	2	2	7
GR1	013MP28A	Alimentat. Decoater	1	1	1	1	4
GR1	013MP28B	Alimentat. Decoater	1	1	1	1	4
GR1	013MP7	5° taglio	2	1	2	1	6
GR1	013MP6A	4° taglio	2	1	2	1	6
GR1	013MP6B	4° taglio	2	1	2	1	6
GR1	013MP23A	Ricircolo gasolio	2	1	2	1	6
GR1	013MP23B	Ricircolo gasolio	2	1	2	1	6
GR1	013MP11	P.A. intermedio	3	2	2	1	8
GR1	013MP31A dismessa	RICIRCOLO GLIO CALDO DA V14	-	-	-	-	-
GR1	013MP31B dismessa	RICIRCOLO GLIO CALDO DA V14	-	-	-	-	-
GR1	013MP9A	P.A. inferiore	2	1	2	1	6
GR1	013MP9B	P.A. inferiore	2	1	2	1	6
GR1	013MP8A	Residuo	3	1		2	6
GR1	013MP8B	Residuo	3	1		2	6
GR1	013TP8C	Residuo	3	1		2	6
GR1	013MP32A	benzina da 13V1 in carica a 13V2	3	1	2	1	7
GR1	013MP32B	benzina da 13V1 in carica a 13V2	3	1	2	1	7
GR1	013TP32C	Refuso grezzo	3	1	2	1	7

Figura 3. Classificazione di rischio macchine RAM

Le strategie manutentive e le politiche gestionali sulle macchine rotanti RAM finalizzate ad incrementare l'affidabilità meccanica e la sicurezza di esercizio saranno condotte tenendo conto di tale classificazione.

Quindi modalità, necessità d'intervento e priorità, a meno di esigenze particolari, saranno stabilite in funzione della criticità definita secondo lo standard di classificazione.

4. SICUREZZA E AFFIDABILITÀ DELLE MACCHINE ROTANTI

Ad oggi presso la Raffineria di Milazzo sono in corso di attuazione nuove strategie manutentive e nuove azioni mirate all'ottimizzazione dell'affidabilità meccanica e della sicurezza delle macchine che vedono principalmente coinvolte le macchine con alta criticità (fascia IC 10÷12).

In particolare tra le principali azioni adottate, in funzione della tipologia di macchina, si vogliono evidenziare le seguenti:

a. Installazione tenute meccaniche triple
b. Installazione di un sistema di Condition Monitoring per le vibrazioni
c. Ridefinizione della strategia di ronda predittiva sulle macchine

4.1. Tenute meccaniche triple

In un contesto di diminuzione dei rischi e aumento della sicurezza particolare attenzione meritano le azioni di miglioria mirate ad aumentare l'affidabilità delle tenute meccaniche in quanto questi componenti rappresentano uno dei principali dispositivi atti a garantire la sicurezza di esercizio di una pompa.

La tenuta meccanica è infatti un elemento che funge da sbarramento alla fuoriuscita di prodotto durante la normale marcia della pompa. In generale la tenuta è montata su un albero rotante ed è costituita da una o più parti mobili che ruotano solidali all'albero e una o più parti fisse.

L'esercizio di una tenuta meccanica prevede l'utilizzo di sistemi ausiliari per il flussaggio e lo sbarramento delle perdite fisiologiche secondo quanto previsto dalle norme API 682.

Esistono diversi tipi di tenute e il loro utilizzo è legato alla severità del servizio ed alla pericolosità del fluido processato dalla pompa.

Le tenute più semplici sono quelle di tipo "singole" cioè costituite da un solo insieme che fa da sbarramento al passaggio del fluido. Tali tenute sono costruttivamente molto semplici ma in questi casi l'eventuale perdita comporta uno sversamento di prodotto direttamente in atmosfera.

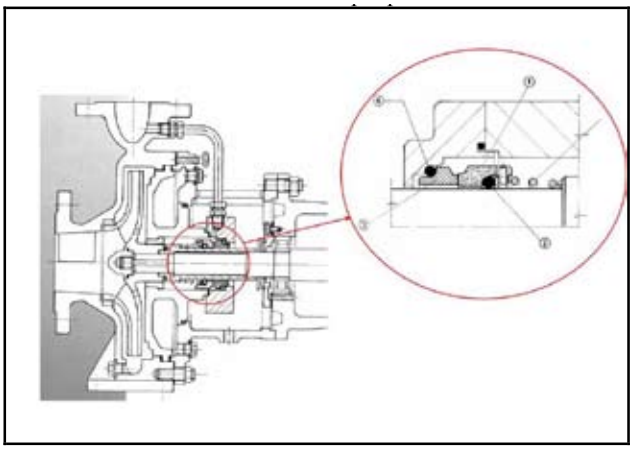


Figura 4. Tipico di tenuta meccanica

Sicurezza intrinseca maggiore è data dalle tenute doppie costituite da due tenute singole con interposta una camera intermedia. In tal caso una perdita dalla tenuta primaria (la prima che fa da sbarramento al fluido di processo) rimane nella camera intermedia in quanto la tenuta secondaria contiene la perdita. Tenute di questo tipo sono solitamente equipaggiate con sistemi di rilevamento della perdita dalla primaria e/o fluidi di sbarramento sulla camera intermedia, secondo quanto previsto dagli API PLAN per le tenute.

Un ulteriore passo avanti verso la sicurezza è rappresentato dall'installazione, ove possibile, delle tenute triple.

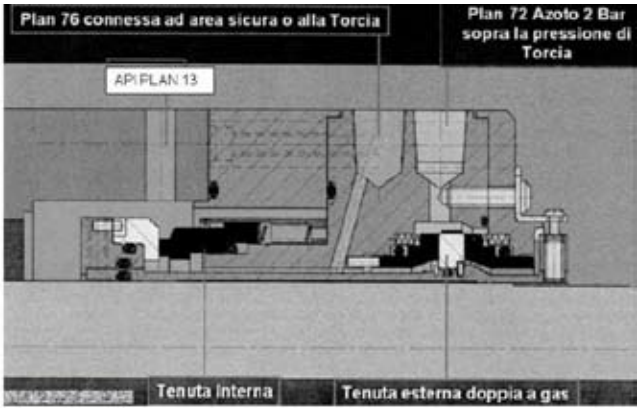


Figura 5. Tipico di tenuta meccanica tripla

Tale tipologia di tenute comprende una tenuta singola interna dal lato processo ed una tenuta doppia lato atmosfera.

Presso la Raffineria di Milazzo sulle pompe dell'impianto di "Movimentazione e Stoccaggio GPL" è stato scelto di installare delle tenute triple in una configurazione che prevede il flussaggio della tenuta interna attraverso il ricircolo del fluido di processo dalla mandata alla camera di tenuta secondo API PLAN 13.

Le perdite fisiologiche del liquido di processo attraverso la tenuta interna sono monitorate secondo APIPLAN 76 e convogliate ad area sicura (es. Blowdown). Su tale linea vengono installati un manometro ed un pressostato con trasmettitore a DCS per la segnalazione di eventuali perdite dalla tenuta interna.

Sulla tenuta esterna doppia di contenimento viene realizzato uno sbarramento con azoto regolato da un pannello di controllo corredato di manometro e pressostato con trasmettitore di segnale a DCS, secondo API PLAN 74.

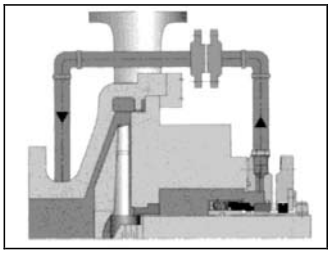


Figura 6. API PLAN 13

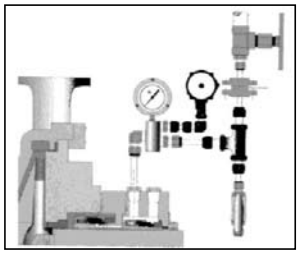


Figura 7. API PLAN 76

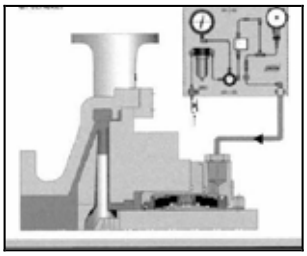


Figura 8. API PLAN 74

Inoltre la tenuta viene provvista di connessione per termocoppia e trasmettitore di temperatura utile a segnalare surriscaldamenti locali e prevenire possibilità di innesco incendi.

I principali vantaggi di una istallazione di questo tipo sono di seguito elencati:

1. Assenza di emissioni di prodotto pompato in atmosfera durante la normale marcia
2. Per lo sbarramento non è necessario l'utilizzo di azoto ad alta pressione, non disponibile su una normale rete di raffineria
3. Facilità di conduzione della tenuta e aumento di affidabilità per via della semplificazione del sistema di flussaggio che non richiede il barilotto e quindi della relativa conduzione con conseguente aumento dell'affidabilità.
4. Presenza di un sistema di monitoraggio delle perdite sia sulla tenuta singola interna che sulla doppia esterna di sbarramento verso l'atmosfera e conseguente limitato rischio di incendio e/o dispersione di nube gassosa.

4.2. Monitoraggio macchine rotanti

Al fine di preservare da danneggiamenti catastrofici le macchine con conseguenze per la sicurezza degli assets di Raffineria e degli operatori d'impianto sono in corso di valutazione le modalità con cui installare sulle principali macchine ad alta criticità un sistema di monitoraggio delle vibrazioni in continuo che gestisca il blocco della macchina in caso di superamento di un valore preimpostato in funzione di un riferimento di soglia storico su quella tipologia di macchina o in funzione delle indicazioni del costruttore.

Il sistema è costituito da sensori applicati alla macchina da monitorare, da uno o più moduli di processamento del segnale ubicati in prossimità delle pompe e collegati fra loro con protocollo seriale e da convertitori seriale / analogico da installare in sala tecnica per l'interfacciamento con il sistema DCS.

I sensori previsti per l'effettuazione del condition monitoring sono i seguenti:

- Sonde di spostamento (eddy probes)
- Sonde di velocità (trasduttori induttivi o piezoelettrici)
- Sonde di accelerazione (a 2 o 3 fili)

Numero e posizionamento delle sonde di vibrazione a bordo macchina dipendono dalla tipologia di macchina:

Pompe verticali:

Sono previsti uno o due punti di rilievo (a seconda della criticità della macchina) posizionati in orizzontale sulla flangia di accoppiamento fra motore e pompa (fig. 9).

Pompe orizzontali (a sbalzo e a doppio supporto):

È previsto un punto di rilievo posizionato in orizzontale sul supporto del cuscinetto lato giunto.

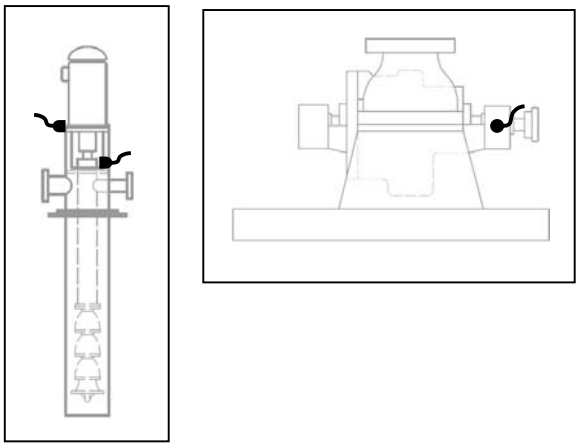


Figura 9. Posizionamento sonde per Condition Monitoring

4.3. Ronde predittiva macchine rotanti

Già da tempo presso la Raffineria di Milazzo è attivo un servizio di manutenzione predittiva e preventiva sulle macchine che prevede attività di rilievo vibrazioni, lubrificazione, analisi oli, raccolta dati di guasto e redazione statistiche di guasto.

Tali attività sono organizzate secondo un servizio di ronda che prevede un calendario di controlli da effettuare sulle macchine secondo una periodicità definita in base alla criticità delle stesse. Ad oggi la ronda prevede cadenza settimanale per un gruppo di macchine considerate critiche e cadenza mensile per la rimanente parte di macchine per cui è previsto un controllo di tipo predittivo.

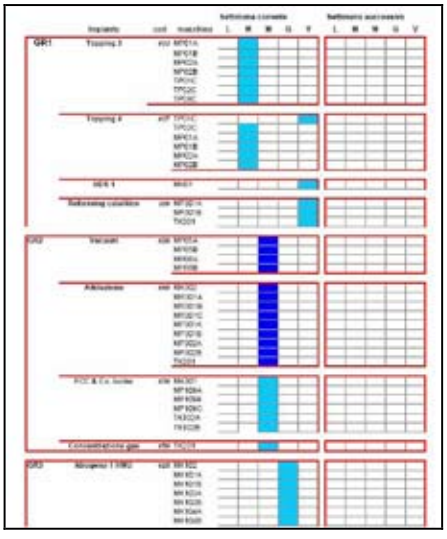


Figura 10. Calendario ronda macchine rotanti

Allo stesso modo il servizio di controllo e mantenimento dei sistemi di lubrificazione è effettuato con una periodicità funzionale alla criticità dell'item interessato.

La classificazione di criticità di cui ai precedenti paragrafi comporta l'esigenza di rivedere la politica di pianificazione della ronda sulle macchine rotanti, sia da un punto di vista della fre-

quenza delle ronde che per quanto riguarda le macchine da considerare “critiche”. Pertanto su tutte le macchine a criticità alta (fascia IC 10÷12) sarà compilato un nuovo calendario di controlli. Tale rielaborazione della ronda riguarderà non solo la frequenza dei controlli ma anche il tipo di accertamento da effettuare al fine di verificare la corretta marcia della macchina.

Tra le attività che sono già state inserite tra le verifiche di ronda ricoprono un ruolo fondamentale ai fini della sicurezza i controlli sui sistemi ausiliari delle tenute meccaniche (perdite da tenute, livello liquido barilotto,controllo pressioni e temperature, ecc.)

5. CONCLUSIONI

Il gran numero di macchine presenti nella Raffineria di Milazzo e la diversificazione per tipologia e servizio ha reso necessario lo studio di un metodo sistematico che permetta di stabilire con esattezza quali sono gli item critici su cui tenere alto il livello di guardia nonché intervenire per aumentarne l’affidabilità. Tutto ciò che riguarda l’affidabilità come analisi guasto, interventi di miglioria, strategie di manutenzione e gestione della sicurezza sarà considerato prioritario per tali macchine, ovviamente senza tralasciare quelle che sono evidenze particolari che possono non essere considerate da una classificazione così sistematica. Le attività descritte nei precedenti paragrafi sono solo tra le principali portate avanti in tale ambito e saranno affiancate da azioni che coinvolgeranno trasversalmente reparti di funzioni diverse (Manutenzione, Produzione, Tecnologico, Sicurezza) interessati ognuno per le proprie competenze.

Studio Teorico-Sperimentale sulle Perdite di Carico Concentrate e Ripartite in Efflusso Bifase

G. Boccardi - G.P. Celata* - R. Trinchieri**
*R. Bubbico***
*F. Di Tosto****
** Istituto di Termofluidodinamica Energetica, ENEA, Roma*
*** Dept. of Chemical Eng. , "La Sapienza" University, Rome*
**** ISPESL-DCC, Rome*

SOMMARIO

Un corretto dimensionamento di una valvola di sicurezza non può prescindere dalla conoscenza della pressione di scarico. Nel caso in cui sia presente una uscita convogliata, diventa necessario valutare le relative perdite di carico che vanno a sommarsi alla pressione finale di scarico nel determinare la contropressione. In condizioni di efflusso bifase il calcolo delle perdite di carico è molto complicato, le correlazioni disponibili più complesse e meno affidabili rispetto alle condizioni monofase e la propagazione dell'errore ha maggiori effetti sul calcolo della portata effluente. Inoltre, la portata scaricata in condizioni bifase è molto più sensibile alla variazione della contropressione che può anche incidere sul raggiungimento delle condizioni di criticità.

Come noto, le perdite di carico possono essere classificate in ripartite e concentrate: nelle condizioni di efflusso bifase, mentre per il primo tipo sono disponibili diverse correlazioni, in genere di discreta affidabilità, che fanno riferimento o meno al flow pattern, nel caso delle perdite concentrate la situazione è più complessa e le correlazioni disponibili meno sicure. In questo articolo saranno presentati i risultati ottenuti da una ricerca sperimentale, condotta in condizioni bifase acqua e vapore, per lo studio delle perdite di carico concentrate su due curve a 90° (ϕi=10 mm) e su un tratto di tubazione di ϕi=10mm. I dati sperimentali sono stati confrontati con le previsioni di diversi metodi proposti in letteratura, anche in funzione delle condizioni di prova; infine si è cercato di sviluppare un'altra correlazione partendo da una già disponibile impiegata per il dimensionamento delle valvole di sicurezza.

1. INTRODUZIONE

Durante un efflusso bifase, i complessi fenomeni termofluidodinamici che avvengono tra le due fasi e l'elevato numero di parametri coinvolti, rende l'analisi e la rappresentazione matematica del processo piuttosto difficile. Ciò comporta la ricerca, tuttora in corso, di correlazioni affidabili per il dimensionamento dei componenti in queste condizioni di efflusso. È evidente che alcuni aspetti della salvaguardia di vite umane, ambiente e impianti siano particolarmente sensibili a questo problema; un corretto dimensionamento di dispositivi quali le valvole di sicurezza anche in queste condizioni di efflusso è indispensabile per garantire l'adeguata sicurezza nella gestione degli impianti. Se sul dimensionamento delle valvole di sicurezza si sta giungendo all'emissione di una normativa ISO [1] tratta da [2] e [3] che fornirà un metodo di calcolo di riferimento, rimane il problema non trascurabile del dimensionamento del collettore di scarico, presente nel caso di valvole con scarico convogliato. Le perdite di carico che avvengono in questo condotto si ritrovano infatti come incremento della contropressione della valvola a

monte e quindi, se non correttamente calcolate, ne possono ridurre la portata scaricata. In definitiva, per un corretto dimensionamento e funzionamento di una valvola di sicurezza in efflusso bifase, è necessario un calcolo attendibile delle perdite di carico nel condotto di scarico. Ciò significa poter disporre di correlazioni affidabili sia nel caso di semplici tubi dritti (perdite di carico ripartite) che per pezzi speciali, quali curve, T, riduzioni di sezione, ecc. (perdite di carico concentrate). La situazione è ulteriormente complicata dal fatto che la caduta di pressione che si verifica durante l'efflusso di un fluido attraverso un condotto rettilineo può essere causata da una variazione di energia potenziale del fluido, da una variazione di energia cinetica e da una perdita di carico per frizione. Sotto forma di equazione, si può dunque scrivere:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{pot} + \Delta p_{acc} + \Delta p_{friz} \qquad (1)$$

Nel caso di efflussi in condotti orizzontali il termine Δp_{pot} è nullo, per cui per la valutazione della perdita di carico totale è sufficiente valutare solo il termine di accelerazione e di frizione. Il termine di accelerazione viene calcolato con la relazione

$$\Delta p_{acc} = G_s^2 \, (v_{out} - v_{in}) \qquad (2)$$

dove G_s è la portata specifica in kg/(m^2 s) e v_{out} e v_{in} sono i volumi specifici rispettivamente in uscita ed in ingresso in m^3/s. Per la valutazione del termine di accelerazione occorre dunque conoscere le condizioni del fluido in uscita (nella fattispecie v_{out}), che è funzione della pressione di uscita e quindi, in ultima analisi, della perdita di carico totale.

In altre parole, in sede di progetto, per il calcolo della caduta di pressione totale si deve usare un metodo iterativo: per esempio, si può valutare dapprima il termine di frizione attraverso uno dei metodi disponibili, sulla base di questo dato ipotizzare un valore di primo tentativo della perdita di carico per accelerazione e calcolare la perdita di carico totale e quindi anche la pressione di uscita. Con questo dato si ricalcola il termine di accelerazione e si verifica la corrispondenza con quello di primo tentativo. Il processo continua fino ad ottenere la convergenza tra questi valori.

La campagna di prove, d i cui sono presentati alcuni risultati in questo articolo, è stata progettata ed eseguita su una sezione di prova, descritta in seguito, disposta orizzontalmente, in modo da ottenere dei dati sperimentali (pressioni, titoli, portate) utili per calcolare direttamente il termine di accelerazione con la (2) e ricavare il termine di frizione con la (1). I valori così ottenuti sono stati confrontati con le previsioni di alcuni metodi di calcolo. Nella stessa sezione di prova sono inserite due curve a 90°, anch'esse opportunamente strumentate, per verificare le previsioni delle correlazioni per le perdite di carico concentrate. In questo caso nella (1) il termine di frizione potrebbe essere trascurabile e la difficoltà della rappresentazione del fenomeno dipenderà dalla complessità degli effetti di una brusca accelerazione in un efflusso bifase. In questa ottica si è provato ad utilizzare, esplicitandola per il calcolo della perdita di carico, la correlazione proposta in [1] per il dimensionamento delle valvole di sicurezza. Oltre a questa si è anche utilizzata ed analizzata la metodologia che riconduce al calcolo di perdite ripartite tramite l'utilizzo della cosiddetta lunghezza equivalente.

2. METODI DI CALCOLO PER PERDITE DI CARICO RIPARTITE

Sono numerosi i fenomeni che interagiscono in maniera complessa durante l'efflusso in bifase; inoltre il loro effetto ha diversi pesi a seconda le condizioni dell'efflusso e le caratteristiche del fluido. Per ridurre la complessità della rappresentazione fisico-matematica dell'efflusso, i metodi spesso assumono delle ipotesi iniziali semplificative; nascono così delle famiglie di modelli che, pur con le loro differenze, sono accumunati da una prima ipotesi di riferimento. Nel caso delle perdite di carico, si distinguono essenzialmente i metodi che prevedono lo slip e quelli che non lo considerano (flusso omogeneo). Questa assunzione ha un effetto importante sulla (2) poiché i volumi specifici sono ben diversi nei due casi. Nell'ipotesi di flusso omogeneo il volume specifico è dato da:

$$v_h = x \, v_g + (1 - x) v_l \qquad (3)$$

Se si abbandona l'ipotesi di flusso omogeneo, accettando la presenza di uno scorrimento tra le fasi e si fa riferimento al bilancio della quantità di moto tra le fasi, si perviene alla seguente definizione per il volume specifico della miscela bifase:

$$v_{qm} = x^2 \frac{v_g}{\varepsilon} + (1-x)^2 \frac{v_l}{(1-\varepsilon)} \qquad (4)$$

Questa definizione di volume specifico deve essere dunque adottata per i metodi che prevedono la presenza di uno slip, quali il metodo di Lockhart-Martinelli [4] e il metodo di Quiben-Thome [5].

A complicare ulteriormente la situazione, in quest'ultimo caso, vi è la non univoca definizione della frazione di vuoto da inserire nell'eq. (4). In questo articolo non affronteremo questo aspetto poiché valuteremo le prestazioni del solo metodo di Lockhart-Martinelli come rappresentante dei modelli con slip; di conseguenza sarà utilizzata la corrispondente formula [6]

$$\frac{1-\varepsilon_{LM}}{\varepsilon_{LM}} = 0.28\, X^{0.71} \qquad (5)$$

per il calcolo della frazione di vuoto dove X è il parametro di Martinelli definito come:

$$X = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.1} \qquad (6)$$

Nel caso delle nostre prove con acqua e vapore a bassi titoli e pressioni, la scelta tra metodo omogeneo e con slip comporta, come evidenziato in figura 1, una variazione rilevante del volume specifico e quindi del Δp di accelerazione; i maggiori scostamenti si hanno per bassi valori della portata specifica G_s.

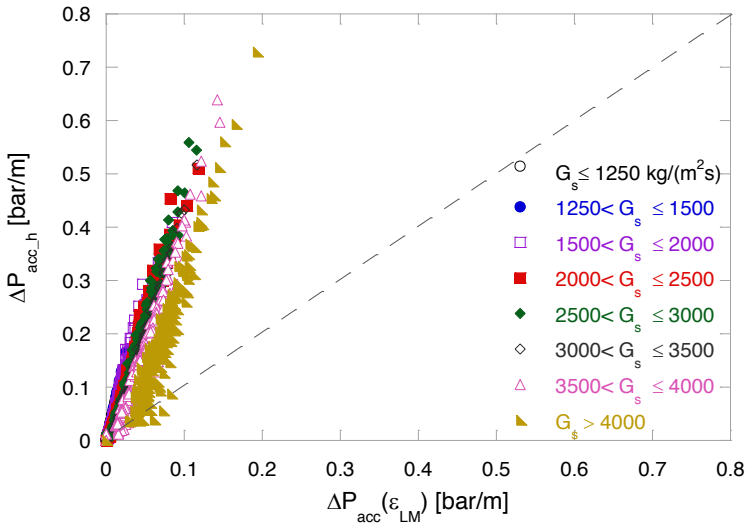


Fig. 1 - Confronto tra Dp_{acc} calcolato con il modello omogeneo e secondo Lockhart-Martinelli

Ovviamente questa differenza si ripercuote tramite la (1) nel calcolo del Δp di frizione e quindi risulta fondamentale per la valutazione delle previsioni di un metodo associargli un calcolo del Δp accelerazione coerente.

Come accennato, la ricerca ha preso in considerazione diversi metodi per il calcolo del Δp di frizione, ma per ovvi motivi di spazio in questo articolo presenteremo solo i risultati ottenuti sui

due metodi che hanno le prestazioni più interessanti, ossia Lockhart-Martinelli per la categoria con slip e Friedel [7] per quelli omogenei.

2.1 Modello di Lockhart-Martinelli

Questo modello [4] è molto semplice dal punto di vista teorico; gli autori mettono in relazione le perdite in bifase con quelle in monofase tramite dei fattori moltiplicativi:

$$\left\{\left(dP/dL\right)_{fr}\right\}_{tf} = \phi_l^2 \cdot \left\{\left(dP/dL\right)_{fr}\right\}_l = \phi_g^2 \cdot \left\{\left(dP/dL\right)_{fr}\right\}_g \quad (7)$$

dove $\left\{\left(dP/dL\right)_{fr}\right\}_l$ e $\left\{\left(dP/dL\right)_{fr}\right\}_g$

sono le perdite di carico per attrito in monofase che le singole fasi creerebbero se passassero da sole all'interno della tubazione; queste sono calcolate tramite la ben nota espressione

$$\left(dP/dL\right)_{fr} = \frac{2 \cdot f \cdot G_s^2}{\rho \cdot d} \quad (8)$$

Introducendo un altro parametro, detto appunto di Lockhart-Martinelli e definito come

$$X^2 = \frac{\left\{\left(dP/dL\right)_{fr}\right\}_l}{\left\{\left(dP/dL\right)_{fr}\right\}_g} \quad (9)$$

è possibile porre in relazione tra loro proprio quest'ultimo e i fattori moltiplicativi ϕ_l e ϕ_g che compaiono nella (7). Per lo sviluppo completo del metodo rimandiamo al [4].

Si noti infine che con il fatto di considerare separatamente le due fasi, si ammette implicitamente la presenza di uno scorrimento fra le stesse; infatti, come già esposto in precedenza nella (5), è possibile pervenire ad una espressione per il fattore di slip propria di Lockhart-Martinelli in cui compare lo stesso parametro X.

2.2. Modello di Friedel

Friedel [7] ha correlato circa 25000 dati di perdite di carico per attrito ottenuti con varie miscele liquido-gas, acqua-vapore, refrigerante R-12 e suo vapore, acqua-aria e olio-aria. Con questi dati ha creato un'equazione empirica che ha la seguente forma:

$$\left\{\left(dP/dL\right)_{fr}\right\}_{tf} \Big/ \left\{\left(dP/dL\right)_{fr}\right\}_l = \left(1-x\right)^2 + x^2 \cdot \left(\frac{\rho_l \cdot \zeta_g}{\rho_g \cdot \zeta_l}\right) + 3.21 \cdot x^{0.78} \cdot \left(1-x\right)^{0.224} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.91} \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0.19} \cdot \left(1-\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0.7} \cdot Fr_{tf}^{-0.0454} \cdot We_{tf}^{-0.035} \quad (10)$$

Le grandezze che compaiono nella (10) sono calcolate nell'ipotesi di flusso omogeneo. Per motivi di spazio rimandiamo a [7] per una sua completa descrizione.

3. METODI DI CALCOLO PER PERDITE DI CARICO CONCENTRATE

Nell'uso comune in condizioni di efflusso monofase, le perdite concentrate dovute alla presenza di pezzi speciali quali curve, T, ecc. sono spesso calcolate con le formule per le perdite di carico ripartite introducendo una "lunghezza equivalente", disponibile nei manuali o calcolata con semplici formule.

Si può pensare di applicare la stessa metodologia anche nel caso di efflussi bifase; a tale scopo abbiamo calcolato il valore della lunghezza equivalente delle curve presenti nella sezione di prova tramite [8], e abbiamo utilizzato le correlazioni di Friedel e Lockhart-Martinelli, con le modalità di calcolo del Δp_{acc} indicate in precedenza, per ottenere le previsioni da confrontare

con i dati sperimentali.

In realtà un approccio di questo tipo mostra evidenti limiti dal punto di vista teorico nel caso di efflusso bifase. La prima osservazione riguarda l'uso di metodi per perdite di carico ripartite proprio dove le perdite per frizione potrebbero essere trascurabili; la seconda il modo di determinare la lunghezza equivalente nel caso di efflusso bifase.

L'efflusso bifase attraverso una valvola di sicurezza, che può essere vista come una situazione simile, è stata infatti affrontata e studiata in maniera approfondita, per le evidenti ripercussioni sulla sicurezza, ricercando correlazioni ad hoc che esprimessero direttamente l'effetto di una brusca variazione di pressione e quindi delle perdite di carico legate all'accelerazione. Inoltre, molti autori hanno proposto metodi per il calcolo del coefficiente di efflusso, che in pratica può essere visto come il corrispettivo di una lunghezza equivalente, che utilizzano correlazioni più o meno complesse e sono funzione delle condizioni del fluido in ingresso. Prendendo spunto da nostre precedenti esperienze su questi argomenti, si è pensato di utilizzare una correlazione affidabile quale quella utilizzata in [1] per il dimensionamento delle valvole di sicurezza in bifase, per arrivare a calcolare le perdite di carico concentrate. Le correlazioni in oggetto sono nate per calcolare la portata effluente note le condizioni di ingresso del fluido bifase e la pressione di uscita (quindi la perdita di carico sulla valvola). Nella nostra situazione, conoscendo le condizioni di ingresso e la portata effluente, occorre esplicitare le correlazioni in modo che forniscano la perdita di carico corrispondente.

L'altro problema da risolvere riguardava il caratterizzare le nostre curve con coefficienti di efflusso in analogia alle valvole. Rimandando a [1] e [9] per un maggiore approfondimento di questo aspetto, nella nostra situazione sperimentale è stato possibile, tramite il calcolo delle perdite di carico in liquido a diverse portate, calcolare sperimentalmente il coefficiente di efflusso in liquido, k_l, delle curve. La metodologia proposta dall'ISO prevede per il calcolo del coefficiente di efflusso in bifase anche la conoscenza del coefficiente di efflusso in gas, k_g; in mancanza di questo dato, viene proposto l'uso del coefficiente del solo liquido, soluzione che noi abbiamo utilizzato nei calcoli. Sui possibili effetti di questa scelta ci soffermeremo nelle conclusioni.

In definitiva utilizzeremo uno sviluppo del metodo HNE-DS [2] e [3] proposto da [1] per il calcolo delle perdite di carico sulle due curve integrato con il coefficiente di efflusso in liquido.

4. CIRCUITO SPERIMENTALE E SEZIONE DI PROVA

L'impianto VASIB (fig. 2) consente prove in flusso bifase attraverso le geometrie di interesse, con contropressione diversa dall'atmosferica. Grazie alla scelta del circuito chiuso, l'impianto permette di mantenere le condizioni di prova per il tempo desiderato.

Come sezione di prova in questa esperienza si definisce, fig. 3, un tratto di tubo dal diametro interno di 10 mm con due curve commerciali a 90°, dello stesso diametro, poste alle sue estremità. Prese di pressione (PS3-PS10) sono disposte a distanza regolare per la valutazione delle perdite di carico.

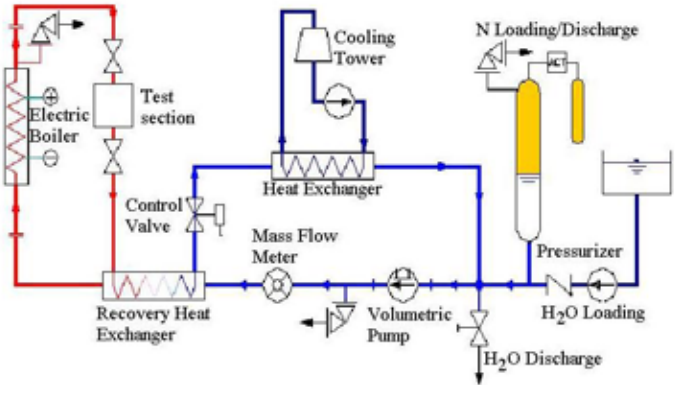


Fig. 2 - Schema dell'impianto per prove sperimentali VASIB

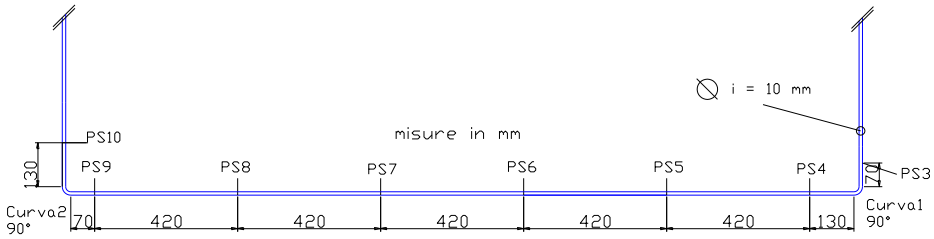


Fig. 3 - Sezione di prova

Le prove sono state ottenute variando portata, pressione e titolo in ingresso; a causa dell'efflusso, pressione e titolo variano tra le differenti prese di pressione. I Δp sono stati misurati tra tutte le prese di pressione ma per l'elaborazione sono stati considerati sono valori superiori a 0.2 bar. Nel caso delle perdite di carico ripartite si sono ottenute 3285 prove valide (tabella 1); le prove sulle curve sono riportate in tabella 2 facendo riferimento al titolo di ingresso.

	range
Pressione (bar)	3.4-17.6
Titolo (%)	0.1-15.4
Portata (kg/h)	297.5-1255
Dp mis(bar)	0.2-2.81

Tabella 1- Prove perdite di carico ripartite: range di esercizio

	N° prove	xin (%)					
		< 1	1-3	3-6	6-9	9-12	12-16
curva1	178	21	39	48	43	19	8
curva2	276	18	58	74	70	44	12
Totale	454	39	97	122	113	63	20

Tabella 2 – Prove perdite di carico curve 90°

5. ANALISI METODI DI FRIEDEL E LOCKHART-MARTINELLI PER LE PERDITE DI CARICO RIPARTITE

Il metodo di Friedel non utilizza lo slip; il termine di accelerazione è quindi calcolato tramite la (2) con il volume specifico dato dalla (3); dal valore del Δp totale misurato si risale quindi, tramite la (1) al Δp di frizione da confrontare con le previsioni del modello in esame. Nella figura 4 sono mostrati i valori delle previsioni del modello Friedel in funzione dei valori misurati.

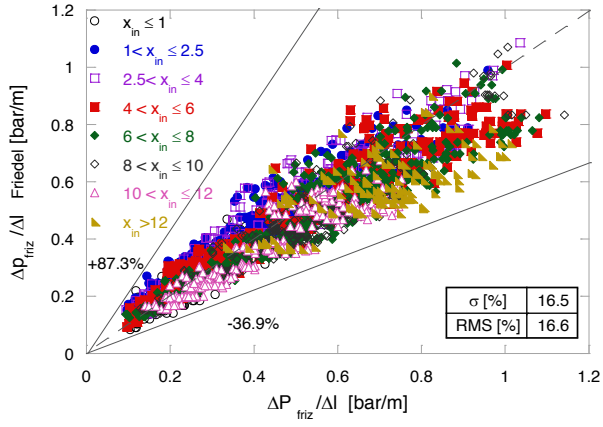


Fig. 4 - Caduta di pressione per frizione per unità di lunghezza calcolata con la correlazione di Friedel rispetto al dato misurato. Parametro: titolo in ingresso

La correlazione fornisce mediamente previsioni di buon livello, essendo caratterizzata da valori dei parametri statistici σ (16.5%) e RMS (16.6%) più che accettabili. Non si notano chia-

re influenze del titolo sulle capacità di previsione se non una tendenza alla sottostima al suo crescere. Nella figura 5 sono riportati i rapporti tra le previsioni del modello e i valori misurati in funzione del titolo in ingresso per i Δp sperimentali misurati tra le prese di pressione PS4 e PS9. Per collegare le prestazioni dei modelli al tipo di efflusso bifase, questo è stimato, tramite la mappa proposta in [5]; nelle condizioni di prova raggiunte si prevedono situazioni di "intermittent" e " dispersed bubble". Dalla figura si evince che gli errori maggiori corrispondono al regime intermittent, in particolare per bassi titoli, mentre per il dispersed bubble si ha un andamento più costante; comunque, per entrambe le situazioni, all'aumentare del titolo sembra ridursi il rapporto tra valori calcolati e reali.

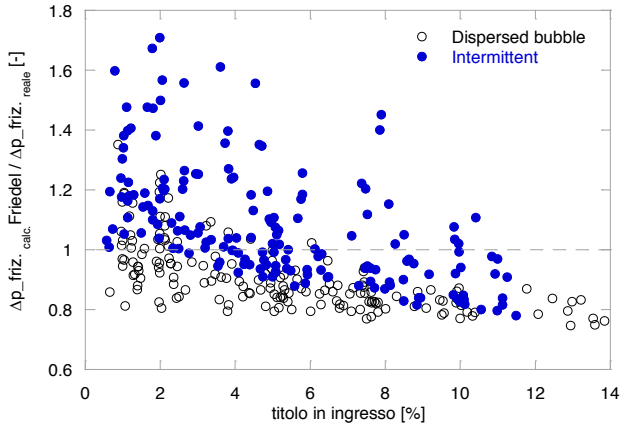


Fig. 5 - Rapporto tra Δp calcolato con la correlazione di Friedel e quello reale (differenza presa P4-P9) in funzione del titolo in ingresso. Parametro: regime di flusso stimato

Nella figura 6 sono presentate le previsioni della correlazione di Lockhart- Martinelli; le sue prestazioni sono inferiori a quella di Friedel con valori superiori degli indicatori statistici. Dalla figura si evince una tendenza alla sovrastima, più evidente per bassi valori di perdita di carico unitaria, mentre è difficile riscontrare particolari influenze del titolo.

Dal confronto delle figure 4 e 6 si notano gli effetti sui valori del $\Delta p_{friz}/\Delta l$ del diverso modo di calcolare il Δp di accelerazione dei modelli omogenei e con slip.

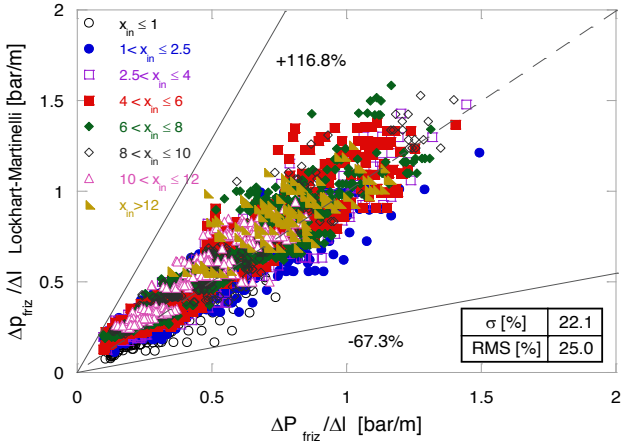


Fig. 6 - Caduta di pressione di frizione per unità di lunghezza calcolata con la correlazione di Lockhart-Martinelli rispetto al misurato. Parametro: titolo in ingresso

Un parametro utilizzato per lo studio dei modelli con slip è il fattore di slip definito come rapporto tra le velocità assolute della fase gassosa e della fase liquida.

$$\Delta slip_{pc} = | slip_{in} - slip_{out} | * 100 / slip_{in} \quad (11)$$

La fig.7 mostra come Lockhart-Martinelli sia fortemente dipendente dal parametro $\Delta slip_{pc}$: infatti, a parità di titolo, le previsioni decrescono all'aumentare di questo parametro. Gli errori maggiori corrispondono ai più bassi valori di $\Delta slip_{pc}$.

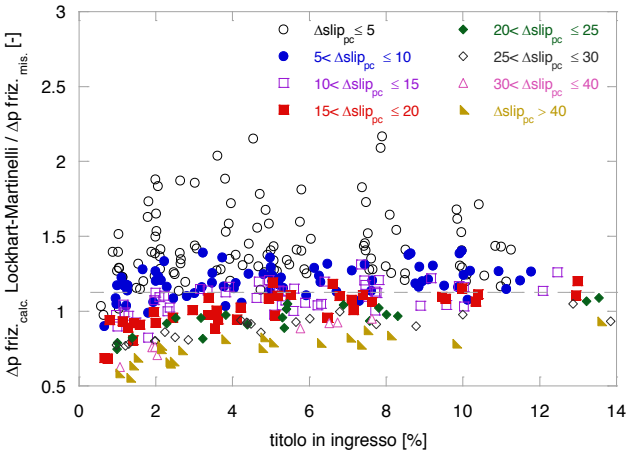


Fig. 7 - Rapporto tra Δp calcolato con la correlazione di Lockhart-Martinelli e quello reale (differenza presa P4-P9) in funzione del titolo in ingresso. Parametro: $\Delta slip_{pc}$

6. ANALISI METODI DI FRIEDEL, LOCKHART-MARTINELLI E HNE-DS PER LE PERDITE DI CARICO CONCENTRATE

Introducendo la lunghezza equivalente, L_{eq}=0.47 m, calcolata con [8] per confrontare i dati misurati con le previsioni dei metodi per perdite di carico ripartite, la perdita di carico su una curva corrisponde alla perdita di un tratto rettilineo di lunghezza pari alla somma della lunghezza equivalente e i due tratti tra la curva e le prese di pressione a monte e a valle (fig. 3). A questo punto, per le applicazioni dei metodi di Friedel e Lockhart_Martinelli valgono le considerazioni esposte nel paragrafo precedente.

Nella figura 8 è mostrato il confronto tra le previsioni del modello di Friedel per unità di lunghezza e i valori misurati.

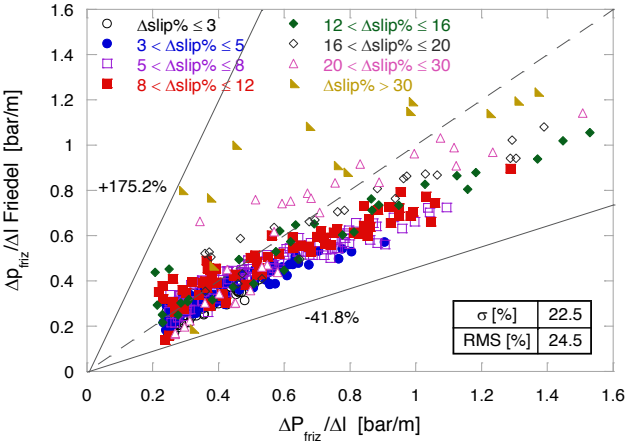


Fig. 8 - Confronto tra Δp calcolato con la correlazione di Friedel con la lunghezza equivalente e quello reale sulle curve 1 e 2. Parametro: $\Delta slip_{pc}$

Le previsioni sono relativamente buone, con una tendenza alla sottostima. In particolare si nota un certo scostamento dal resto delle altre previsioni per i valori maggiori di $\Delta slip_{pc}$.

Nella figura 9 è presentato lo stesso confronto per le previsioni del metodo di Lockhart-Martinelli. Questo metodo ha prestazioni decisamente migliori, con una minore tendenza alla sottostima. E' interessante notare come i punti si stratifichino al variare di $\Delta slip_{pc}$, con le previsioni peggiori per i suoi valori maggiori.

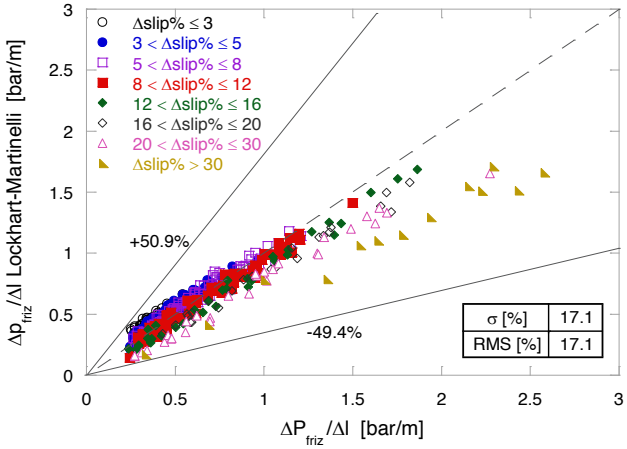


Fig. 9 - Confronto tra Δp calcolato con la correlazione di Lockhart-Martinelli con la lunghezza equivalente e quello reale sulle curve 1 e 2. Parametro: $\Delta slip_{pc}$

Infine nella figura 10 sono presentate le previsioni del modello HNE-DS; in questo caso il confronto avviene sul Δp_{tot} poichè questo metodo calcola direttamente le perdite di carico concentrate. Le previsioni non sembrano particolarmente influenzate da alti valori di $\Delta slip_{pc}$ e i valori statistici sono leggermente migliori rispetto a quelli Lockhart-Martinelli. In questo confronto occorre però ricordare che i metodi precedenti possono risentire delle modalità di calcolo del termine di accelerazione.

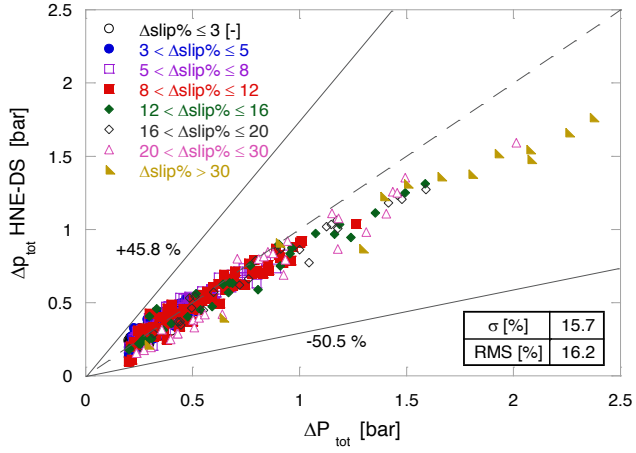


Fig. 10 - Confronto tra Δp calcolato con HNE-DS e quello reale sulle curve 1 e 2. Parametro: $\Delta slip_{pc}$

7. CONCLUSIONI

Nell'analisi dei dati sperimentali si sono evidenziate le consuete problematiche legate alla ancora non chiara comprensione e rappresentazione dei fenomeni che avvengono durante un efflusso bifase. In particolare, si è dovuta accettare una elaborazione preliminare dei dati speri-

mentali (calcolo della componente di accelerazione) che è frutto di ipotesi teoriche e che quindi condiziona le analisi seguenti. Basta ricordare (fig. 1) come cambia il termine di accelerazione a seconda del metodo di calcolo utilizzato. Per questo motivo abbiamo associato ai due metodi provati un calcolo del termine di accelerazione coerente con le loro ipotesi.

Fatta questa doverosa premessa, possiamo osservare che la rappresentazione della perdita di carico concentrata con una lunghezza equivalente porta all'apparente contraddizione che il metodo migliore (Friedel) nel confronto sui dati delle perdite di carico ripartite sia peggiore quando valuta queste situazioni, formalmente simili. Ciò potrebbe dipendere da:

- Una lunghezza equivalente minore del necessario; in tal caso, poiché il metodo di Friedel mediamente sottostima (fig.4) mentre Lockhart-Martinelli sovrastima (fig. 6), quest'ultimo sarebbe favorito.
- L'effettiva presenza di slip, conseguente alla brusca accelerazione nella curva. A supporto di ciò, il metodo di Friedel, che non prevede lo slip, ha i maggiori errori in corrispondenza dei valori maggiori di $\Delta slip_{pc}$ (fig. 8).

L'applicazione del metodo HNE-DS esplicitato per il calcolo della perdita di carico, risulta interessante come prestazioni e non sembra dipendere in maniera evidente dal $\Delta slip_{pc}$. In realtà, per una sua corretta applicazione, occorrerebbe associarlo ad un coefficiente di efflusso bifase [1] che non è possibile definire per le curve esaminate. L'utilizzo del solo k_l, pratica usuale in questa situazione, comporta una possibile sovrastima del Δp calcolato. L'errore prevedibile è comunque basso poiché, essendo k_l =0.74, k_g non può essere di molto superiore e quindi, per motivi legati alla modalità del suo calcolo [9], il coefficiente di efflusso in bifase non potrà essere molto diverso.

In conclusione, dalla valutazione delle esperienze condotte si conferma la difficoltà di predire le perdite di carico in bifase, sia ripartite che concentrate; i metodi esaminati, pur avendo mediamente prestazioni medie, non garantiscono una previsione sufficientemente affidabile. Il metodo HNE-DS esplicitato per il calcolo del Δp concentrati è interessante ma dovrà essere rivisto per valutare meglio sia l'effetto di un calcolo più accurato del k_d sia la possibilità di correzioni legate alle differenze tra valvole di sicurezza e perdite di carico concentrate.

BIBLIOGRAFIA

[1] ISO/DIS4126-10, Safety devices for protection against excessive pressure – Part 10: Sizing of safety valves for gas/liquid two-phase flow, 2008

[2] R. Diener, J. Schmidt: "Sizing of Throttling Device for Gas/Liquid Two-Phase Flow Part 1: Safety Valves", Process Safety Progress, Vol.23, No.4, 2004, pp. 335-344

[3] R. Diener, J. Schmidt: "Sizing of Throttling Device for Gas/Liquid Two-Phase Flow Part 2: Valves, orifices and noz", Process Safety Progress, Vol.24, No.1, 2005, pp. 29-37.

[4] R. W. Lockhart, R. C. Martinelli: "Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component in pipes" Chem. Eng. Process, vol.45 n.1,1949, pp.39–48

[5] J. M. Quiben, J. Thome : "Flow pattern based two-phase frictional pressure drop model for horizontal tubes, Part II: New phenomenological model", International Journal of Heat and Fluid Flow vol. 28, 2007, pp. 1060–1072

[6] Butterworth, D., "A Comparison of Some Void Fraction Relationships for Co-Current Gas–Liquid Flow", International Journal of Multiphase Flow, vol. 1, 1975, pp. 845–850

[7] L. Friedel: "Improved friction drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow" negli atti della conferenza European Two-phase Flow Group Meeting, paper E2, Ispra, Italy, 1979

[8] M. Doninelli "Le Reti di Distribuzione" Quaderni Caleffi http://www.caleffi.us/it_IT/caleffi/Details/Handbooks/pdf/quaderno_1_it.pdf, pp 61

[9] G. Boccardi, R. Bubbico, G.P. Celata, F. Di Tosto R. Trinchieri "Comparison among Three Prediction Methods for Safety Valves Design in Two-Phase Flow in the case of a Small Valve" Chemical Engineering Transactions, vol. 19, pp175-182 2010 DOI: 10.3303/CET 1019029

Dispositivi a disco di rottura: requisiti principali per la corretta installazione e manutenzione

*V. De Lisio**
*C. Di Girolamo***
*C. Robino****

**ISPESL, Dipartimento di Campobasso*
***ISPESL, Dipartimento di Como*
****FIKE Europe B.V.B.A, Milano*

SOMMARIO

In ambito industriale gli accessori per la limitazione diretta della pressione sono dispositivi di sicurezza che hanno lo scopo di proteggere le attrezzature quando la sovrapressione e/o il vuoto all'interno delle stesse può raggiungere livelli pericolosi per l'integrità strutturale delle apparecchiature in questione.

Tra gli accessori di sicurezza i dispositivi a disco di rottura trovano applicazione quando l'eventuale innalzamento di pressione all'interno del sistema può derivare, ad esempio, da esplosioni confinate di gas o polveri ovvero per lo sviluppo incontrollato di una reazione esotermica.

Per questi dispositivi di protezione, oltre la verifica della corretta installazione, il regolamento applicativo riguardante l'esercizio delle attrezzature a pressione ex decreto 1° dicembre 2004, n.329, impone il mantenimento dei requisiti di corretta funzionalità, così come assegnati dai relativi fabbricanti, nelle diverse condizioni d'esercizio.

Tuttavia, uno degli aspetti maggiormente sottovalutati dall'utente, in sede d'installazione di questi accessori è quello legato alla non corretta installazione e alla insufficiente manutenzione che, compromettendone il funzionamento, può influire sulla sicurezza ultima delle attrezzature da proteggere.

In tal senso, la norma armonizzata EN ISO 4126-6 ha fissato, tra l'altro, gli elementi principali riguardanti la selezione e l'installazione dei dischi di rottura.

Gli autori partendo dalle disposizioni cogenti, prese a riferimento le indicazioni della norma armonizzata e le istruzioni operative dettate dal fabbricante, nella presente relazione hanno esaminato e riassunto i requisiti generali di installazione dei dispositivi a frattura prestabilita posti a protezione di attrezzature in pressione, fornendo alcune indicazioni per le buone pratiche di impianto.

1. INTRODUZIONE

Un sistema di sicurezza per attrezzature a pressione può essere individuato come un dispositivo atto a proteggere l'apparecchiatura dal superamento dei limiti di funzionamento ammissibili ove, in generale, i valori di soglia sono individuabili nei parametri ammessi di pressione, temperatura, livello, portata ovvero in una combinazione di suddetti valori, assegnati dal fabbricante in sede di progettazione dell'attrezzatura di lavoro presa in esame; in termini più generali un sistema di sicurezza deve essere in grado di "evitare che i parametri di processo superino i

valori limite ultimi determinati mediante l'analisi del pericolo, garantendo l'eliminazione e il controllo dei rischi inerenti lesioni alle persone, danni all'ambiente e danni alle proprietà[1]".

Nell'ambito di applicazione della direttiva 97/23/CE[2] in materia di attrezzature a pressione, i dispositivi di protezione e la loro combinazione ricomprendono gli accessori di sicurezza, cioè determinati dispositivi atti ad impedire che nelle attrezzature protette siano superati i limiti ammissibili di progetto ed adeguati dispositivi di controllo, quali indicatori o allarmi, tali da consentire di mantenere l'attrezzatura a pressione entro i limiti ammissibili di progetto in modo manuale o automatico.

A loro volta gli accessori di sicurezza comprendono i dispositivi di limitazione della pressione che attivano i sistemi di regolazione o che chiudono e disattivano l'attrezzatura, quali pressostati, termostati, livellostati, ecc. e i dispositivi per la limitazione diretta della pressione, quali ad esempio valvole di sicurezza e dischi di rottura. Quest'ultimi a seconda dell'applicazione possono essere utilizzati come dispositivi unici di limitazione o dispositivi abbinati ad altri analoghi.

Propriamente, un dispositivo di sicurezza a disco di rottura è un dispositivo di limitazione della pressione non richiudibile che tipicamente comprende un disco di rottura, che è una parte del dispositivo di sicurezza destinato a contenere la pressione ed è progettato per aprirsi mediante rottura a una pressione prestabilita, e un contenitore del disco di rottura. Esistono in commercio numerose tipologie di dispositivi di sicurezza a disco di rottura prodotte in materiali resistenti alla corrosione, sia metallici sia non metallici, in grado di coprire una vasta gamma di dimensioni nominali, pressioni di rottura e temperature in gioco; tali dispositivi sono molto utilizzati per proteggere da sovrapressione attrezzature di lavoro quali reattori chimici, recipienti, tubazioni, bombole di gas o altri involucri contro la sovrappressione e/o il vuoto eccessivo.

Le tipologie di disco a rottura (rupture disk o bursting disk) disponibili in commercio per la protezione delle attrezzature a pressione sono, a seconda della loro forma geometrica nella sezione meridiana principale, individuabili nei seguenti elementi: disco di rottura bombato concavo, disco di rottura piano e disco di rottura rovescio (o convesso); il primo ed il secondo tipo sono anche comunemente indicati con la dicitura "forward acting" in quanto la rottura avviene per tensione del materiale, mentre il terzo tipo "reverse acting" è caratterizzato per la rottura mediante compressione.

Un disco di rottura bombato convenzionale (sia esso concavo o rovescio) è costituito da un cappello, in genere metallico a strato singolo oppure multistrato, pizzicato tra due flange aventi una parte periferica, che può essere piana (flat seat) oppure inclinata, ed una parte centrale concava nel verso della pressione di rottura; lo spessore di un disco di rottura è di solito ridotto, dell'ordine del centesimo di millimetro, a seconda della taratura di scoppio da realizzare. In generale, comunque, la taratura viene realizzata, sulla base dell'esperienza del fornitore, combinando le caratteristiche meccaniche e lo spessore del materiale con l'eventuale forma e direzione degli intagli; ad esempio intagli in direzione radiale consentiranno l'apertura "a petali" del disco.

Oltre a quanto sopra detto esistono categorie di dischi dove l'apertura del dispositivo è governata da una lama posta a valle del disco stesso; quando la superficie del disco inizia a deformarsi (a "gonfiarsi") va a premere sulla lama che taglia il disco stesso permettendo la corretta apertura e lo scarico della sovrappressione. Tra i principali vantaggi impiantistici che tendono a far privilegiare l'uso di un disco a frattura prestabilita, rispetto all'applicazione, a parità di condizioni di protezione, di una valvola di sicurezza, si possono annoverare quelli di essere in grado di reagire velocemente a un rapido e incontrollato innalzamento di pressione, di non essere molto sensibile ad incollamenti, a particelle solide e gelo, ai fluidi anticorrosivi, di essere meno costoso, di non essere dotato di parti mobili o meccanismi supplementari, di richiedere poca manutenzione d'esercizio, ecc.

Ciò premesso, nelle pagine seguenti, prendendo spunto dalle disposizioni normative e esaminate alcune regole d'installazione dei dispositivi a disco di limitazione diretta della pressione utilizzati come dispositivi unici o posti in abbinamento con valvole di sicurezza, si prendono in esame alcuni criteri per il corretto montaggio e funzionamento di tali accessori di sicurezza.

2. NORME DI RIFERIMENTO APPLICABILI

Con l'entrata in vigore della direttiva europea 97/23/CE riguardante le attrezzature a pressione, recepita in ambito nazionale dal D.Lgs. n.93/2000[3] e con le disposizioni integrative ex DM n.329/2004[4] viene richiesta la protezione dell'attrezzatura dal superamento dei limiti ammissibili di funzionamento installando, opportunamente, determinati dispositivi di protezione qualora, in condizioni ragionevolmente prevedibili, si renda possibile in esercizio che questi limiti possano, in qualche modo, essere superati.

In questo contesto i dispositivi di protezione comprendono gli accessori di sicurezza, considerati essi stessi attrezzature a pressione, da sottoporre a procedura di certificazione, e adeguati dispositivi di controllo, tra i quali indicatori ed allarmi che "consentono di mantenere l'attrezzatura sotto pressione entro i limiti ammissibili in modo automatico o manuale".

In generale va considerato per gli accessori di sicurezza, il D.Lgs 93/2000, all'allegato II, in relazione alla loro applicazione, richiede che siano classificati nella IV categoria[5], tranne i casi speciali, nei quali è consentita una classificazione nella medesima categoria dell'attrezzatura da proteggere. Inoltre, il costruttore, tra i requisiti essenziali di sicurezza adottati in fase di progetto deve garantire, anzitutto, che in condizioni di utilizzazione ragionevolmente prevedibili, gli accessori di sicurezza siano costruiti in modo da essere affidabili e adatti al loro uso previsto e tener conto, nel caso, dei requisiti di sicurezza in ordine alla manutenzione e alle modalità di prova di tali dispositivi.

Tra le norme armonizzate, ai sensi della direttiva PED, sono degne di nota la EN 764-7 e la EN ISO 4126-3. La prima è una norma orizzontale che si applica ad attrezzature a pressione per le quali si vuole assicurare la protezione da condizioni di esercizio estreme; essa definisce i requisiti per la progettazione, l'applicazione e la marcatura dei dispositivi che sono ottenuti come prodotto della combinazione in serie di valvole di sicurezza o sistemi di sicurezza controllati (CSPRS) conformi alle parti 1, 4 e 5 della EN ISO 4126 e di dispositivi di sicurezza a disco di rottura conformi alla parte 2 della medesima norma installati ad una distanza non maggiore di 5 volte il diametro della tubazione dall'ingresso della valvola.

La norma EN 764-7 è posta a supporto del fabbricante per la verifica della corretta individuazione ed applicazione dei RES previsti dall'allegato I della direttiva PED. In particolare, essa descrive i requisiti dei sistemi di sicurezza messi a protezione delle attrezzature a pressione (recipienti e tubazioni) non esposte alla fiamma. La norma in questione include una descrizione delle varie tipologie di dispositivi e i relativi criteri di scelta, la descrizione delle caratteristiche dei dispositivi di sicurezza per la limitazione diretta della pressione, ecc. Per gli accessori di sicurezza la norma fornisce i riferimenti alle norme armonizzate di costruzione se disponibili o i criteri di base cui gli stessi devono sottostare, i criteri di installazione e le verifiche da effettuare prima della messa in funzione.

Preso in esame l'esercizio delle installazioni a pressione, con l'approvazione del decreto 1° dicembre 2004, n.329, è stato chiarito quanto segue:

- *la scelta del tipo e il dimensionamento dei dispositivi di protezione è posta a carico dell'utilizzatore o del fabbricante l'attrezzatura, tenuto conto delle condizioni d'esercizio e di installazione a regime, di transitorio e di emergenza;*
- *per i dispositivi di protezione, l'utente è chiamato a garantire la permanenza nel tempo dei requisiti di funzionalità, secondo quanto stabilito a suo tempo dal fabbricante in sede di progettazione dei medesimi dispositivi;*
- *in occasione delle verifiche di funzionamento, in sede di riqualificazione periodica, l'utilizzatore deve provvedere affinché sia possibile l'esecuzione delle prove e delle indagini di funzionalità degli accessori di sicurezza.*

Per quanto attiene, invece, la regolamentazione riguardante l'esercizio di recipienti fissi a pressione di gas liquefatti o compressi, vapori, ecc. e dei relativi dispositivi di sicurezza antecedente l'entrata in vigore del D.M n.329/2004 è riconducibile espressamente al DM 21 maggio 1974[6] e alle conseguenti specifiche applicative previste dalla "Raccolta E". Tale norma nazionale, ad oggi, per le parti non in contrasto[7] con le disposizioni dettate dal D.Lgs n.93/2000 e del DM n.329/2004, riporta, tra l'altro, le modalità operative per l'installazione e l'esercizio di accessori di sicurezza quali valvole di sicurezza e dispositivi a frattura prestabilita destinati ad essere installati su recipienti in pressione ivi descritti. L'analisi di sicurezza condotta seguendo le disposi-

zioni del regolamento ex "Raccolta E" prevede, ad esempio, la determinazione della capacità di scarico degli accessori di sicurezza mediante l'applicazione di quanto riportato al parag. E.1.D. tenuto conto delle cause di radice che determinano l'intervento del dispositivo di sicurezza in esame; tali cause secondo tale impostazione sono riconducibili ad anomalie di esercizio e/o incendio esterno all'apparecchiatura in pressione.

Va considerato, inoltre, che in certe condizioni d'impianto[8], altresì, le disposizioni applicative ex DM 21/5/1974 richiedevano, tra l'altro, all'utente dell'apparecchiatura a pressione di predisporre una relazione tecnica riportante:

- *la tipologia di processo con particolare riferimento ai dispositivi di limitazione diretta o indiretta della pressione e/o della temperatura di progetto dell'apparecchio da proteggere;*
- *gli elementi identificativi dei dispositivi di sicurezza previsti e un programma di controlli, previsti in base all'esperienza acquisita dall'utente nell'esercizio dell'impianto o su impianti similari, atti a giustificare l'affidabilità dei suddetti dispositivi nel periodo tra due verifiche successive;*
- *l'indicazione delle tipologie e delle modalità di controllo dei dispositivi di sicurezza posti a protezione dell'impianto da effettuare in sede di verifica periodica;*
- *omissis.....*

Sempre restando in quest'ambito, oltre le valvole di sicurezza, da porre a corredo dell'impianto, o di ciascuna parte dello stesso, doveva essere scelta a cura dell'utente dell'impianto, in relazione alle caratteristiche del processo e sulla base della pratica d'esercizio delle attrezzature di lavoro ovvero di altri impianti di egual specie. In altri termini, secondo tale norma, l'attribuzione della dotazione dei dispositivi di sicurezza e il pertinente programma di controllo degli stessi, ai fini dell'efficienza, poteva essere assegnato secondo l'esperienza maturata dall'utente nell'esercizio dell'impianto a pressione. In particolar modo, va ricordato, parimenti, che le disposizioni ex "Raccolta E" non riportano alcuna prescrizione o riferimento circa il mantenimento nel tempo dei requisiti di funzionalità dei dispositivi di sicurezza, se non il riscontro in sede di verifica periodica dell'intervento, alle pressioni di taratura, dei medesimi dispositivi.

Da ultimo si rileva che, nell'ambito della corrispondenza tra norme cogenti e norme armonizzate, prese a riferimento le caratteristiche prestazionali dei dispositivi di sicurezza in esame, il progettista o il verificatore dell'attrezzatura non può non tener contro che nella determinazione della capacità di scarico (q_{m}) per i dischi a frattura prestabilita destinati a scaricare gas o vapori (monofase) in condizioni di salto critico, tra le formule riportate in Raccolta E e le corrispondenti relazioni proposte dalla norma armonizzata EN ISO 4126-6:2005, a parità di coefficiente di efflusso e di sezione trasversale di sfogo installata A_0, v'è una corrispondenza, in rapporto alle portate massiche, pari al 62%. In altri termini, tra le sezioni minime trasversali nette (A_0) in corrispondenza del disco applicando, rispettivamente, le disposizioni ex Raccolta E e quelle della norma armonizzata citata, a parità di coefficiente di efflusso e di portata massica scaricata q_{m}, sussiste un rapporto pari a 1,61. Da quanto ora accennato deriva che in sede di verifica della funzionalità degli accessori in esame si tende a sovrastimare, in favore della sicurezza globale dell'attrezzatura protetta, l'area di flusso minima richiesta per il disco conseguente dalla verifica[9] ex Raccolta E rispetto a quanto scaturisce, invece, dall'applicazione del metodo semplificato di appendice C della norma armonizzata EN ISO 4126-6.

3. TIPOLOGIE IMPIANTISTICHE E CONDIZIONI DI INSTALLAZIONE

In termini generali per tutte le applicazioni, per qualsiasi accessorio di sicurezza, valgono le seguenti regole basilari volte ad evitare che, in condizioni di installazione, la rottura dell'assieme di sicurezza e l'eventuale frammentazione o proiezione di materiale possa:

- *compromettere il corretto funzionamento di tutti gli altri dispositivi di sicurezza installati sull'attrezzatura da proteggere;*
- *provocare una riduzione del flusso di scarico all'interno del sistema di limitazione diretta della pressione;*
- *influire sulla capacità di scarico effettiva degli altri dispositivi di sicurezza installati, ecc.*

Il disco di rottura può essere montato con la funzione di dispositivo di protezione primario o anche in serie ad una valvola di sicurezza per preservare la stessa dalla corrosione; è noto,

infatti, che in campo industriale gli accessori di sicurezza a disco di rottura possono essere utilizzati come dispositivi unici di limitazione della pressione, abbinati a valvole di sicurezza o incorporati in un dispositivo combinato. Ciò premesso, di seguito richiamiamo alcuni criteri di base concernenti l'applicazione dei dischi a frattura nei diversi casi ricorrenti.

Anzitutto va riferito che, l'installazione di un disco a rottura, quale dispositivo unico di limitazione della pressione (*fig.1*), può essere preferito, ad esempio, nel caso in cui:

- *Il tempo di intervento (o di risposta) dell'alzata della valvola di sicurezza, tenuto conto degli attriti e delle inerzie di natura meccanica in gioco, renda la stessa inadeguata rispetto al gradiente di pressione interna del fluido contenuto nell'attrezzatura;*
- *Le condizioni di funzionamento del dispositivo, ad esempio per l'esercizio a basse temperature, possano impedire o ostacolare il corretto funzionamento della valvola di sicurezza;*
- *non possano essere tollerate perdite del fluido nelle condizioni di esercizio assegnate;*
- *le condizioni di esercizio possano comportare l'accumulo di depositi che renderebbero inservibile la valvola di sicurezza;*
- *siano richieste ampie aree di scarico o di apertura, ecc.*

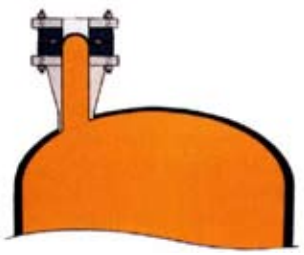


Figura 1 – Esempio di montaggio di dispositivo unico a frattura prestabilita

Inoltre, come già anticipato, gli accessori a disco possono essere utilizzati in abbinamento a una o più valvole di sicurezza; in tale contesto possiamo discernere le seguenti modalità inerenti d'installazione del dispositivo a frattura prestabilita:

- *in serie, per proteggere la valvola di sicurezza dalla corrosione, dalle incrostazioni o da condizioni di esercizio che possono influire sulle prestazioni in campo della valvola di sicurezza ovvero per evitare perdite di fluido o, ancora, per evitare la perdita totale di contenuto dalle attrezzature protette in seguito alla rottura del disco di rottura;*
- *in parallelo, come sistema di protezione aggiuntivo o ridondante mediante l'inserzione di altro dispositivo a frattura prestabilita.*

Per quel che concerne quest'ultimo caso impiantistico (*fig.2*) ci limiteremo soltanto a riferire che il disco viene selezionato, a parità di altre condizioni, in modo da garantire una pressione di rottura non maggiore dei pertinenti valori assegnati dal fabbricante alle attrezzature da proteggere.

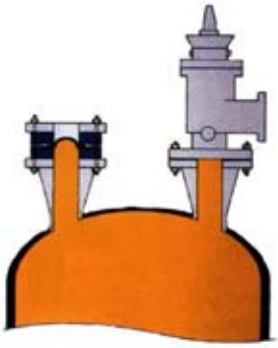


Figura 2 - Dispositivo a disco di rottura utilizzato in parallelo alla valvola di sicurezza

4. COLLEGAMENTO DI DISCO A ROTTURA INSERITO A MONTE DI VALVOLA DI SICUREZZA

Si può avere la necessità di installare il disco a rottura a monte o a valle della valvola di sicurezza stessa in modo da formare un sistema di sicurezza. In particolare, nel caso in cui il dispositivo a frattura richieda di essere installato a monte della valvola di sicurezza (fig. 3), valgono i seguenti criteri primari di installazione:

a. i requisiti di rottura riguardanti la certificazione e la marcatura del disco devono risultare corrispondenti ai requisiti progettuali e di fabbricazione assegnati all'attrezzatura alla quale esso è destinato;

b. per le applicazioni nelle quali il dispositivo di sicurezza a disco di rottura fa parte di un dispositivo combinato, i requisiti devono risultare conformi alle norme di riferimento applicabili al complesso dei dispositivi;

c. l'interspazio esistente tra il disco di rottura e la valvola di sicurezza deve essere munito di un mezzo (dispositivo) atto ad impedire l'accumulo non ammissibile di pressione.

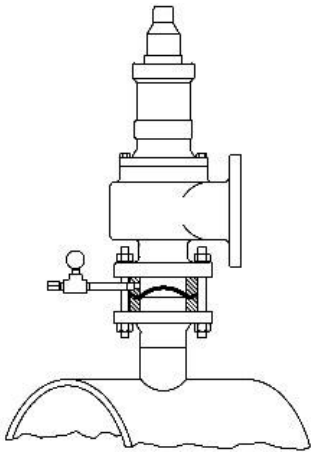


Figura 3 - Dispositivo a disco di rottura installato a monte di una valvola di sicurezza

Per la tipologia impiantistica in esame si possono distinguere, ancora, due modalità d'installazione:

1. *dispositivo a disco di rottura installato entro 5 diametri di tubo dalla valvola di sicurezza;*
2. *disco di rottura montato oltre i 5 diametri di tubo (L>5d) a monte della valvola di scarico.*

Nel primo caso (L<5d) valgono i principi di installazione considerati nella precedenza e riportati in modo specifico nella norma tecnica EN 4126 parte terza e sesta.

Nel caso in cui, invece, il disco a rottura risulti montato oltre i 5 diametri di tubo a monte della valvola di scarico occorre, in particolare, assicurare quanto segue:

- la pressione massima di rottura, alla temperatura associata[10], non sia maggiore del 10% della pressione massima ammissibile[11] (PS) dell'attrezzatura protetta oltre che la pressione di esercizio[12] non superi mai in modo permanente la PS;
- il disco dopo l'intervento non interferisca con il corretto funzionamento della valvola di sicurezza13; in questo caso è preferibile l'uso di dispositivi a disco non frammentabile o elementi assimilabili.
- per la sezione e la lunghezza della tubazione di immissione di collegamento tra l'attrezzatura da proteggere e l'ingresso della valvola di sicurezza e il disco a rottura siano fissate alcune restrizione di tipo geometrico e funzionale riportate al parag. 8.4 della norma armonizzata EN 764-7;
- lo spazio valvola-disco, qualsiasi sia la distanza, sia dotato di un dispositivo di rilevamento delle perdite inserita a valle del disco.

In relazione a quest'ultimo requisito, anche le specifiche tecniche applicative ex Raccolta E, parag. E.1.D.4., punto 8, hanno richiesto che nell'installazione di un'apparecchiatura a pressione fosse garantito quanto segue: "*Nel caso di dispositivo a frattura prestabilita installato a monte di valvola di sicurezza, o di altro dispositivo a frattura prestabilita, nell'interspazio tra due dispositivi di sicurezza, deve essere applicato un congegno atto a segnalare la presenza di pressione o a tenere l'interspazio stesso a pressione atmosferica. Inoltre, in caso di presenza di pressione nell'interspazio l'utente deve provvedere prontamente alla sostituzione del dispositivo, o quando possibile a depressurizzare l'interspazio sino alla sostituzione del dispositivo ..omissis..*".

In altri termini la presenza di una pressione nell'interspazio disco-valvola in seguito ad esempio ad una perdita del disco a causa di fenomeni di corrosione locale o la generazione di contropressioni nelle tubazioni di scarico del dispositivo può ingenerare le condizioni, alla pressione di rottura, di mancato intervento del disco stesso. In tal caso è richiesta l'installazione e il controllo, in regime d'esercizio dell'attrezzatura, di un dispositivo atto a verificare l'accumulo di pressione nell'interspazio disco-valvola; in una installazione di tal genere, quindi, si inserisce tra valvola di sicurezza e disco di rottura un accessorio indicatore di pressione (fig. 4) che serve a segnalare l'aumento di pressione dovuto a trafilamenti di fluido attraverso le eventuali fessurazioni prodotte per corrosione o altro.

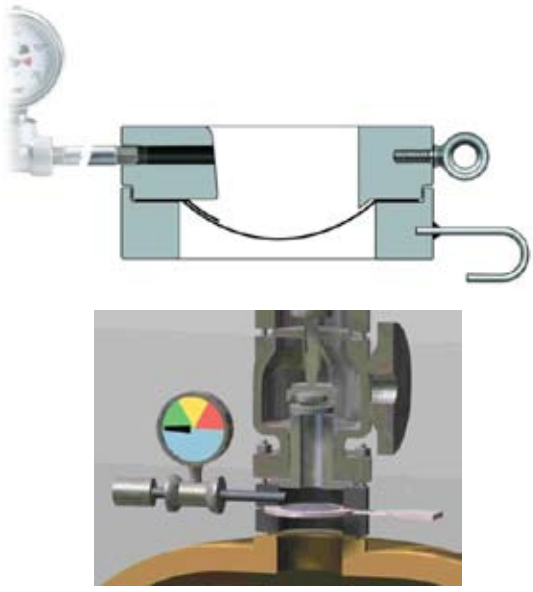


Figura 4 – Sezioni raffiguranti l'inserzione dell'accessorio di controllo del disco

5. INSTALLAZIONE DI DISCO A FRATTURA INSERITO A VALLE DI VALVOLA DI SICUREZZA

Quando dall'analisi della norme di progetto e dall'analisi di sicurezza condotta sull'attrezzatura in pressione risulti la necessità di installare un dispositivo a disco di rottura posto in combinazione sull'uscita della valvola di sicurezza (fig.5), devono garantirsi i seguenti requisiti progettuali ed impiantistici principali:

1. la valvola di sicurezza sia progettata in modo da garantire la completa apertura dell'otturatore al raggiungimento della propria pressione di taratura, qualunque sia la contropressione che può accumularsi tra il disco valvola e il dispositivo di sicurezza a disco di rottura;

2. lo spazio tra il disco valvola e il dispositivo di sicurezza a disco di rottura deve potersi sfiatare o spurgare per evitare l'accumulo di pressione dovuta a una piccola quantità di perdita proveniente dalla valvola. In altri termini lo spazio tra il disco di rottura e la valvola di sicurezza deve essere provvisto di un mezzo per impedire l'accumulo inaccettabile di pressione.
3. il dispositivo di sicurezza a disco di rottura e le tubazioni di scarico devono essere progettati in modo da non compromettere le caratteristiche di esercizio della valvola di sicurezza;
4. la pressione di rottura del dispositivo di sicurezza alla temperatura del disco corrispondente sommata a qualsiasi eventuale pressione presente nella tubazione di scarico non deve eccedere la pressione di progettazione della porzione di uscita della valvola di sicurezza e di qualsiasi tubo o accessorio presente tra la valvola di sicurezza e il dispositivo di sicurezza a disco. In nessun caso la pressione di rottura del dispositivo di sicurezza a frattura, alla temperatura corrispondente, sommata a qualsiasi eventuale pressione presente nella tubazione di uscita deve eccedere la pressione massima ammissibile dell'attrezzatura a pressione o la pressione di taratura della valvola di sicurezza.

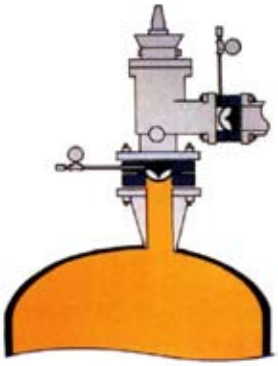


Figura 5 - Dispositivi a disco di rottura in abbinamento con valvola di sicurezza

6. ESEMPIO DI ISTRUZIONI OPERATIVE (RIFERITE A BUONE PRATICHE D'IMPIANTO)

L'esempio applicativo più semplice ma significativo è rappresentato dalle regole per la corretta installazione/sostituzione di un disco di rottura; riportiamo qui di seguito uno stralcio riassuntivo di alcune istruzioni operative concernenti l'installazione sicura dei dispositivi di rottura in esame:

Raccomandazioni di carattere generale

1. *Il dispositivo a disco di rottura e nessuno dei suoi componenti deve subire modifiche, se non previste o approvate dal fabbricante*
2. *Il dispositivo di sicurezza deve essere posto quanto più vicino possibile all'attrezzatura da proteggere, tenendo conto delle pulsazioni di pressione, della temperatura e delle altre condizioni di esercizio.*
3. *Il sistema di limitazione della pressione deve essere adeguatamente dimensionato, installato su una tubazione quanto più corta possibile e a sviluppo lineare, che scarichi in modo da non arrecare danni o condizioni di pericolo per persone o cose*
4. *Maneggiare con cautela il disco di rottura un quanto i bordi potrebbero essere affilati e quindi potrebbero causare tagli all'operatore*
5. *Evitare che sul lato a monte del dispositivo di sicurezza a disco e nella parte del condotto, si possano depositare composti sublimati corrosivi o altri solidi in grado di influire sul funzionamento ultimo del disco di rottura*
6. *Prima di mettere in servizio il disco a rottura, assegnarne un periodo di sostituzione ap-*

propriato; tale periodo deve tener conto ad esempio del tipo di disco, dei materiali di fabbricazione, delle condizioni di servizio alle quali è sottoposto il disco, della temperature in gioco, delle risultanze delle ispezioni, ecc.

7. *Il periodo di sostituzione del disco, in presenza di incrostazioni ovvero di fenomeni di corrosione riguardanti il disco e in altre condizioni di servizio non meglio valutabili, deve essere tale da non compromettere la sicurezza ultima dell'attrezzatura a pressione*

Raccomandazioni operative (di assemblaggio)

1. *Il dispositivo a disco deve essere ispezionato visivamente prima dell'installazione al fine di verificare l'assenza di difetti e deve essere installato in modo da evitare danni*
2. *Controllare attentamente la targhetta del disco verificando la compatibilità del disco non il contenitore porta disco.*
3. *Posizionare il componente lato processo (holdown) del contenitore porta disco su una superficie di lavoro mantenendo la zona di alloggiamento del disco rivolta verso l'alto.*
4. *Posizionare il disco dall'alto facendo attenzione a che la freccia riportata sulla targhetta e quella riportata sul contenitore porta disco (holdown) abbiano lo stesso verso.*
5. *Allineare e posizionare la parte superiore del porta disco (base) sul disco facendo attenzione che anche la freccia del contenitore porta disco (base) sia rivolta come le altre.*
6. *Ruotare la parte superiore del porta disco in modo da allineare i fori filettati delle due parti del contenitore porta disco (holdown e base), posizionare le "sideclips" ed avvitare, posizionare le guarnizioni sulla flangia, spostare il contenitore porta disco sopra la guarnizione.*
7. *Controllare l'orientamento delle frecce sul porta disco e sulla targhetta del disco e verificare che siano coerenti con la direzione del fluido di processo*
8. *Pulire e lubrificare (SAE grade 20) tiranti e bulloni. Non utilizzare tiranti che mostrino evidenti segni di corrosione, ruggine, ecc.*
9. *Posizionare la seconda guarnizione sulla superficie superiore del porta disco assemblato*
10. *Con procedimento "a crocera" applicare la coppia di serraggio (indicata del fornitore) in 4 step con incrementi della coppia del 25%. Nell'eseguire questa procedura controllare, dopo ogni step di incremento di coppia, che le distanze tra le flange rimangano uguali per ogni tirante.*

Raccomandazioni di verifica post-installazione

1. *Eseguire un controllo visivo su tutta la superficie del disco e del contenitore porta disco: controllare che non vi siano difetti quali crepe e che non vi siano depositi di materiale sulla superficie, in tal caso pulire la superficie con prodotti compatibili con i fluidi di processo contenuti nell'attrezzatura da proteggere*
2. *Eseguire un esame visivo delle superfici del disco e del contenitore porta disco con cadenza regolare secondo le indicazioni fornite dal fabbricante*
3. *Provvedere alla sostituzione del disco secondo la cadenza fissata dal costruttore del dispositivo ed eventualmente dall'utente. Tale periodo può essere aumentato o diminuito sulla base delle indicazioni fornite dal fabbricante, delle registrazioni e delle valutazioni di funzionamento maturate dall'utente, delle prove in condizioni simulate, delle previsioni delle norme cogenti, delle risultanze conseguenti le verifiche di funzionamento in occasione delle verifiche periodiche, ecc.*

BIBLIOGRAFIA PRINCIPALE

[1] Russo G., Tufano V.: Protezione di apparecchiature contro le esplosioni interne. CUEN, ed. 9/1985.

[2] Etchells J., Wilday J.: Workbook for chemical reactor relief system sizing. HSE Research Report, 136/1998.

[3] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n.93: Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione.

[4] Fike Corporation: Rupture disc sizing. Technical bullettin TB8102, ed. 2/2000.

[5] EN 764-7: Attrezzature a pressione. Sistemi di sicurezza per attrezzature a pressione non

esposte a fiamma, 2002 - AC/2006.

[6] EN ISO 4126-2: Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrapressioni. Parte 2: Dispositivi di sicurezza a disco di rottura, 1/2003.

[7] EN ISO 4126-3: Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrapressioni. Parte 3: Valvole di sicurezza in combinazione con dispositivi di sicurezza a disco di rottura, 6/2006.

[8] EN ISO 4126-6: Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrapressioni. Parte 6: Dispositivi di sicurezza a disco di rottura, 3/2005.

[9] Decreto Ministeriale 1 dicembre 2004, n.329: Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art.19 del decreto legislativo 23 febbraio 2000, n.93.

[10] Fike Corporation: "ASME code and rupture discs. Technical bullettin TB8100-1", ed. 3/2007.

NOTE

(1) Tale è il contenuto della norma EN 764-7 inerente i sistemi di sicurezza di attrezzature a pressione non esposte a fiamma, armonizzata alla direttiva di prodotto 97/23/CE.

(2) Il testo della direttiva europea 97/23/CE (PED) è stato pubblicato nella G.U. della Comunità Europea in data 09 luglio 1997, n. L181

(3) Si riferisce al decreto di «Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione», in s.o. n.62 alla G.U. del 18 aprile 2000, n.91.

(4) «Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art.19 del decreto legislativo 25 febbraiio 2000, n.93», in s.o. n.10 alla G.U. del 28 gennaio 2005, n.22.

(5) Nel senso della classificazione di attrezzature a pressione in base all'applicazione di quanto riferito all'art.9 del D.Lgs. 25/2/2000, n.93, in ordine crescente di rischio.

(6) «Norme integrative del regolamento approvato con R.D. 12 maggio 1927, n.824 e disposizioni per l'esonero da alcune verifiche e prove stabilite per gli apparecchi a pressione», in G.U. 10 luglio 1974, n.179.

(7) Per vero anche il D.Lgs 3 agosto 2009, n.106, in materia di sicurezza sul lavoro non ha abrogato, né esplicitamente modificato, la regolamentazione nazionale precedente relativa agli apparecchi a pressione, risultando abrogati, invece, solo i contenuti dei regolamenti precedenti che risultano, manifestamente, in contrasto o diversamente elaborati rispetto al titolo III, capo I, relativo all'uso delle attrezzature di lavoro.

(8) In applicazione delle condizioni ex art. 9 del Decreto Ministeriale 21 maggio 1974.

(9) Relativamente alle valutazioni pertinenti le anomalie d'esercizio dell'attrezzatura da proteggere e non già quelle dovute alla valutazione per incendio esterno all'apparecchiatura in pressione.

(10) Rappresenta la temperatura del disco associata ad una pressione di rottura e che è la temperatura prevista del disco quando ne è richiesta la rottura (da EN 4126-2, 3.14)

(11) Definita come pressione massima per la quale l'attrezzatura in pressione è progettata, come specificata dal costruttore (cfr. EN 764-7, 3.19 ovvero direttiva 97/23/CE, art.1, c.2.3).

(12) Intesa come pressione esistente nelle normali condizioni di esercizio all'interno dell'attrezzatura protetta.

(13) È importante riferire che una delle limitazioni connesse all'utilizzazione di un sistema di tal genere consiste nel rischio di otturazione della valvola da parte dei frammenti del disco in caso di superamento della pressione di rottura del dispositivo stesso.

Programma per il Dimensionamento delle Valvole di Sicurezza in Bifase secondo ISO/DIS4126-10 e Confronto con Dati Sperimentali

G. Boccardi* - G.P. Celata* - R. Trinchieri*
F. Di Tosto**
** Istituto di Termofluidodinamica Energetica, ENEA, Roma,*
*** ISPESL-DCC, Roma*

SOMMARIO

Da diversi anni il gruppo di lavoro ISO/TC 185/WG sta lavorando sui problemi legati al dimensionamento delle valvole di sicurezza in efflusso bifase. Lo scopo è di giungere ad una normativa, che, pur tenendo conto dell'estrema complessità delle fenomenologie legate all'efflusso bifase, consenta un dimensionamento in sicurezza con modalità di calcolo relativamente semplici. Lo sviluppo è partito dal modello di riferimento teorico HEM, Homogeneous Equilibrium Model, ed ha affrontato diversi aspetti, tra cui l'insorgere dell'efflusso critico, la definizione di un coefficiente di efflusso in bifase, la valutazione di differenti condizioni d'ingresso (sottoraffreddato, saturo e bifase). Nel corso dell'attività sono state sviluppate alcune procedure di dimensionamento fino a giungere alla soluzione attuale, riportata nel documento ISO/DIS4126-10 [1]. Il metodo ivi proposto, pur non raggiungendo la difficoltà dei codici di calcolo, è relativamente complesso richiedendo calcoli iterativi e la conoscenza delle proprietà fisiche del fluido evolvente.

Durante una pluriennale collaborazione ISPESL-ENEA su questo tema, gli autori hanno sviluppato dei programmi di simulazione per l'analisi di dati sperimentali: il software presentato nell'articolo, raccoglie questi programmi consentendo il dimensionamento secondo l'ultima proposta ISO/DIS4126-10 e secondo altri due metodi di letteratura per un immediato confronto delle rispettive capacità di previsione. Il software, che attualmente implementa le proprietà fisiche dell'acqua, consente anche una valutazione dello stato di aggregazione del fluido (mono o bifase) in funzione della causa generante l'incremento di pressione, sempre in accordo con la ISO/DIS4126-10. Nelle conclusioni sono inoltre esposte alcune considerazioni sulle prestazioni dei metodi di dimensionamento implementati.

1. INTRODUZIONE

Il dimensionamento di dispositivi di sicurezza e condotti di scarico interessati da efflusso bifase è allo studio da diversi anni per giungere alla definizione di metodi di calcolo affidabili per tutti i possibili scenari di scarico. Le principali difficoltà risiedono nella corretta valutazione degli stati termodinamici in ingresso valvola e dei relativi regimi di flusso, nella giusta valutazione delle condizioni di efflusso critiche e nell'adattabilità dei metodi alle possibili geometrie della valvola (caratterizzata dal diametro dell'orifizio, dalla lunghezza del canale di passaggio e dalla forma dello stesso).

Riguardo l'importanza delle condizioni di ingresso per i metodi di dimensionamento, occorre dire che, in certe situazioni, la miscela bifase può essere efficacemente schematizzata da un modello omogeneo. Dal punto di vista idrodinamico, questo modello ipotizza un perfetto mescolamento tra le fasi che viaggiano dunque con la medesima velocità attraverso il sistema

di scarico. Sotto il profilo termodinamico, la miscela bifase viene trattata come uno pseudo fluido con caratteristiche intermedie (ottenibili da medie pesate sul titolo) rispetto alle due fasi costituenti.

La schematizzazione omogenea è più aderente alla realtà nel caso di miscele a basso titolo o ad alto titolo. In questi casi, infatti, una fase risulta finemente ed uniformemente dispersa nell'altra e le caratteristiche fisiche del fluido sono prossime a quelle della fase predominante. Nel caso di fluido monocomponente, inoltre, influisce anche il valore della pressione di ingresso sulla maggiore aderenza del modello omogeneo all'efflusso reale: infatti, quanto più questa si approssima alla pressione critica del fluido tanto più le caratteristiche fisiche delle due fasi tendono ad uniformarsi.

In altre situazioni, soprattutto in condizioni di titolo intermedio ed in corrispondenza di particolari regimi di flusso (stratified, intermittent, annular, ecc.), vengono a porsi problematiche legate al possibile scorrimento tra le fasi: in questi casi, è più corretto avvalersi di modelli che tengano conto delle diverse caratteristiche meccaniche dell'efflusso delle due fasi (modelli non omogenei).

In definitiva, si può pensare alla schematizzazione omogenea come ad un modello di equilibrio meccanico (pari velocità delle fasi, proprietà fisiche mediate sul titolo, ecc.) e a quella non omogenea come ad un modello di disequilibrio meccanico (diversa velocità di efflusso delle fasi con conseguente introduzione del concetto di scorrimento tra esse).

Anche sotto il profilo termodinamico, può essere fatta una distinzione tra situazioni di equilibrio e di non equilibrio. Si parla di equilibrio termodinamico quando si ipotizza che il fluido modifichi il suo stato molto velocemente in conseguenza di una variazione di parametri quali pressione e temperatura: in altre parole, ad una variazione per quanto veloce, ad esempio della pressione, corrisponde un istantaneo adeguamento del titolo della miscela. Questa ipotesi non trova completo riscontro nel fenomeno reale in quanto alle effettivamente rapide depressurizzazioni non può fisicamente corrispondere un istantaneo adeguamento dei parametri termodinamici, tanto più che, proprio in virtù dei grossi Δp in gioco, la fuoriuscita di fluido è molto veloce. All'amplificarsi o meno di questa situazione di disequilibrio concorrono anche le caratteristiche geometriche dei canali della valvola. E' stato infatti dimostrata l'esistenza di una lunghezza di rilassamento [2] entro la quale viene raggiunta una condizione di equilibrio termodinamico.

In conclusione, si può affermare che i modelli di non equilibrio forniscono i migliori risultati laddove si ritenga predominante l'effetto della rapidità del fenomeno di espansione per cui la valvola non può considerarsi in condizioni di equilibrio termico e di trasporto di materia tra le fasi. Ciò vale, in particolare, per ugelli corti (meno di 10 cm) in cui il tempo di residenza del fluido è troppo corto per una significativa vaporizzazione [2]: per questo, in tali modelli, le equazioni di flusso sono integrate a titolo costante.

Relativamente al raggiungimento dello condizioni critiche durante l'efflusso occorre sottolineare il grande divario esistente tra i casi monofase e bifase. L'indicazione più attendibile per la valutazione della velocità del suono in bifase è quella di raccordare la velocità del suono nella fase liquida a quella tipica della fase vapore (4-5 volte più piccola di quella in fase liquida per l'acqua) in funzione del diverso titolo in vapore della miscela stessa. Va osservato comunque che non sono note determinazioni sperimentali in miscele bifase a validità generale. Come noto, il raggiungimento delle condizioni di efflusso sonico implica una riduzione del salto di pressione disponibile allo smaltimento della portata: questa risulta quindi minore di quella prevedibile ipotizzando efflusso subsonico, con conseguenti rischi per l'incolumità delle apparecchiature da proteggere.

Riguardo le caratteristiche geometriche della valvola, occorre dire che, già per efflussi monofase, i modelli sono sviluppati su ugelli geometricamente ideali ed avvalendosi di ipotesi termodinamiche semplificative. Una valvola reale smaltisce invece una portata diversa dalla teorica: per ottenere una corrispondenza tra i valori calcolati e da quelli ottenuti sperimentalmente vengono forniti dai costruttori dei coefficienti di efflusso (in monofase). Questi fungono da "fattori di correzione" sia delle semplificazioni geometriche che termodinamiche alla base dei calcoli. A partire dai coefficienti di efflusso monofase possono essere definiti i coefficienti di efflusso in bifase in vari modi [3,4]: anche questi sono intrinsecamente legati alle ipotesi adot-

tate (per esempio efflusso isentropico, ecc) per lo sviluppo del metodo di dimensionamento.

Un importante aspetto del dimensionamento di una valvola di sicurezza da istallare su un'apparecchiatura in pressione riguarda la preliminare valutazione della composizione della fase fluida da scaricare in caso di sovrapressioni. E' chiaro infatti che, qualora il possibile insorgere dell'efflusso bifase non sia previsto o correttamente considerato, si avrà un sottodimensionamento della valvola, che non sarà così in grado di proteggere come richiesto circuiti e componenti ad essa afferenti.

La previsione della tipologia della fase scaricata è legata alla causa scatenante la sovrapressione. In sintesi, si può dire che tale previsione viene condotta in maniera diversa a seconda che la causa dell'incremento di pressione sia una reazione esotermica incontrollata interna al recipiente da proteggere oppure una fonte di calore esterna (ad esempio un incendio). Nei due casi risultano diverse le modalità di formazione di bolle di vapore nel corpo del fluido: l'ingrossamento volumetrico conseguente può portare fluido monofase oppure bifase in ingresso valvola. Sullo stato di aggregazione del fluido allo scarico influiscono anche le sue caratteristiche di viscosità e di schiumosità.

Il software presentato in questo documento implementa la procedura riportata nella ISO/DIS4126-10 per la valutazione della tipologia della fase scaricata. Consente inoltre il calcolo della portata in massa scaricabile da una valvola di caratteristiche geometriche note conoscendo il salto di pressione disponibile, oppure il calcolo del diametro dell'orifizio della valvola conoscendo la portata da smaltire ed il salto di pressione disponibile. I risultati ottenuti in queste due modalità con il metodo ISO sono confrontabili con quelli che si otterrebbero utilizzando un metodo di equilibrio omogeneo (HEM) ed uno omogeneo di non equilibrio (HNE), anch'essi implementati.

Nella seconda parte di questo documento saranno confrontate le previsioni dei tre metodi con i valori ottenuti sperimentalmente sull'impianto VASIB sito presso la centro ricerche ENEA della Casaccia, al fine di valutarne la capacità di previsione al variare di alcuni parametri di riferimento.

2. LA PREVISIONE DELLA COMPOSIZIONE DEL FLUIDO ALLO SCARICO

Abbiamo già anticipato l'importanza di stabilire l'effettivo stato di aggregazione del fluido che raggiunge la sezione d'ingresso della valvola di sicurezza: in effetti, il prevedere erroneamente lo scarico di un fluido monofase anziché bifase e dimensionare la valvola per questo caso non garantisce un'adeguata sezione di passaggio per lo smaltimento della portata volumetrica utile alla depressurizzazione.

Ipotizziamo che la valvola di sicurezza sia montata alla sommità del recipiente da proteggere e che questo sia inizialmente riempito di liquido fino ad una altezza indicata da ϕ_0 (in percentuale dell'altezza totale). Le modalità di formazione delle bolle dipendono dalla causa scatenante la sovrapressione.

Nel caso di reazione chimica esotermica incontrollata l'aumento di pressione può essere dovuto ad una produzione di vapore (che aumenta con la temperatura, sistemi tempered), alla formazione di gas incoercibili (sistemi gassy) oppure alla produzione contemporanea sia di elementi volatili che incoercibili (sistemi hybrid). L'aumento di pressione provoca l'apertura della valvola e la conseguente depressurizzazione del recipiente. Questa provoca il surriscaldamento del liquido presente nel recipiente con conseguente formazione di bolle nel corpo del fluido: se la velocità di formazione/crescita delle bolle supera quella di risalita/distacco dalla superficie libera del liquido, aumenta il volume della miscela, che raggiunge l'ingresso della valvola in forma bifase anziché monofase.

Nel caso in cui il recipiente sia soggetto a fonti di calore esterne, l'incremento di pressione nel recipiente è dovuto alla produzione di vapore prevalentemente in corrispondenza delle pareti dello stesso. In questo caso, limitatamente alla presenza di fluidi non schiumosi nel recipiente (la ISO/DIS4126-10 si occupa solo di questa tipologia di fluidi), si può affermare che l'aumento di livello può risultare più contenuto con conseguente riduzione della probabilità di efflusso bifase: quest'ultimo è possibile solo se il grado di riempimento iniziale del recipiente risulti superiore ad un valore limite [5].

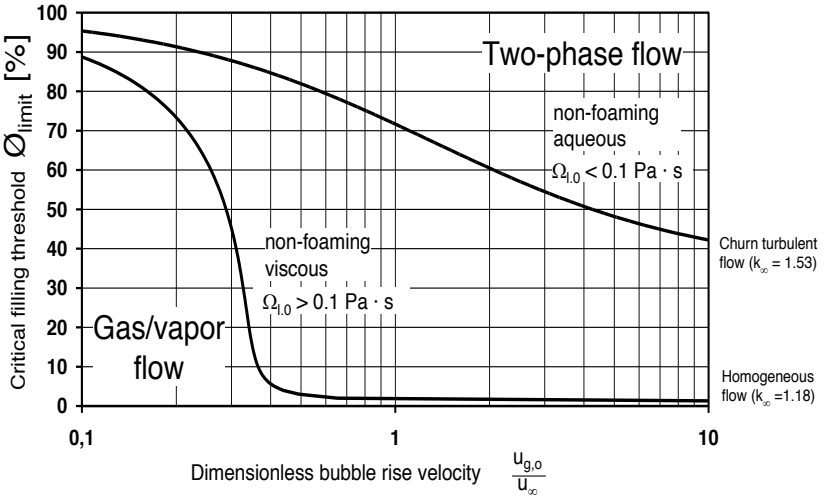


Fig. 1 –Valutazione del tipo di flusso in funzione del livello di riempimento del serbatoio e delle velocità caratteristiche $u_{g,0}$ e u_{∞}

La fig. 1 [6] mostra il livello critico di riempimento per passare da efflusso monofase a bifase in funzione della velocità di formazione delle bolle e di quella di risalita. Essa evidenzia anche l'importanza della viscosità del fluido sulla fenomenologia dell'efflusso. Per fluidi più viscosi, le bolle hanno maggiore difficoltà a staccarsi dalla superficie liquida: ne consegue un maggior aumento di livello della fase liquida e quindi maggiori probabilità di efflusso bifase (omogeneo).

3. I METODI DI DIMENSIONAMENTO DELLE VALVOLE DI SICUREZZA IN BIFASE

L'equazione per il calcolo della portata in massa Gr scaricabile attraverso una valvola avente un'area della sezione minima di passaggio pari ad "A"è:

$$G_r = k_d \, G_t \, A \qquad (1)$$

G_t è la portata specifica teorica che attraversa un ugello ideale (isentropico). I modelli omogenei calcolano G_t assumendo che la miscela bifase sia omogenea e che le fasi liquida e vapore scorrano alla stessa velocità attraverso la valvola. Di conseguenza tutti i parametri fisici sono definiti da medie pesate sul titolo (x). I modelli omogenei possono essere ulteriormente divisi in modelli di equilibrio (HEM) e di non equilibrio (HNE), in dipendenza delle assunzioni sull'equilibrio termodinamico di cui si è parlato.

Il metodo HEM implementato nel software è basato sui lavori di Leung [7] e calcola Gt in bifase con la relazione:

$$G_t = \frac{\sqrt{-\omega \ln(\eta) - (\omega - 1)(1 - \eta)}}{\omega \cdot (1/\eta - 1) + 1} \cdot \sqrt{\frac{2 p_0}{v_0}} \qquad (2)$$

dove η è p_{out}/p_0 e ω è un caratteristico parametro definito nel modello, funzione solo delle condizioni di ingresso:

$$\omega = \frac{x_0 v_{g,0}}{v_0} + \frac{c_{p\,l_{,0}} T_0 p_0}{v_0} \cdot \left(\frac{v_{g,0} - v_{l,0}}{\Delta h_{v,0}} \right)^2 \qquad (3)$$

In condizioni critiche, nell'eq. (2) il rapporto η è sostituito dal rapporto di pressione critico η_c (uguale a pcr/p0) calcolato dalla

$$\eta_c^{\,2} + \left(\omega^2 - 2\omega\right)\cdot\left(1-\eta_c\right)^2 + 2\omega^2\cdot \ln\eta_c + 2\omega^2\cdot\left(1-\eta_c\right) = 0 \qquad (4)$$

Il metodo proposto nella ISO/DIS4126-10, nel seguito indicato come ISO, tratto dal lavoro di Diener e Schmidt [4] a cui la norma si ispira, è formalmente identico al modello HEM sopra illustrato. Esso però introduce un parametro N, correlato al ritardo nella nucleazione delle bolle funzione di η_c e x_0. Questo parametro, che moltiplica il secondo termine dell'eq.(3) è calcolato con la relazione:

$$N = \left(x_0 + c_{pl,0} T_0 p_0 \cdot \frac{v_{g,0} - v_{l,0}}{\Delta h^2_{v,0}} ln(1/\eta_{cr}) \right)^{0.4} \qquad (5)$$

N assume valori compresi tra 0 e 1; per valori alti il modello tende all'HEM (for N=1 l'equazione è la stessa) mentre per bassi valori prevale l'ipotesi di non equilibrio.

Il modello HNE presente nel software è stato implementato come proposto in [8]: esso descrive con una buona accuratezza l'evoluzione di fluidi che siano già in condizioni bifase all'ingresso della valvola o che lo diventino durante il passaggio al suo interno. Anche questo metodo fa uso di un parametro N per tener conto di situazioni intermedie tra equilibrio e non equilibrio termodinamico.

Per il calcolo del coefficiente di efflusso, Lenzing e al. [3] hanno proposto di correlarlo alla frazione di vuoto calcolata alle condizioni di ingresso, $\alpha_{0,}$ conoscendo i coefficienti di efflusso in liquido, k_l e in gas, k_g:

$$k_d = \alpha_0 k_g + (1-\alpha_0) k_l \qquad (6)$$

In queste ipotesi, il valore di kd si colloca tra kl e kg. In [4], gli autori suggeriscono di modificare l' eq. (6) introducendo un valore della frazione di vuoto (α_{seat}) calcolato in corrispondenza della sezione di gola della valvola, secondo la:

$$\alpha_{seat} = 1 - \{ v_{l,o}/v_o [\omega(1/\eta - 1) + 1] \} \quad (7)$$

Il metodo ISO implementato nel software fa uso del coefficiente di efflusso calcolato secondo quest'ultima modalità, il metodo HEM si avvale del coefficiente di efflusso calcolato secondo Lenzing (eq.6). Anche al metodo HNE è stato attribuito questo coefficiente di efflusso bifase (anche se non esplicitamente indicato in [8]).

4. IL PROGRAMMA PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE VALVOLE DI SICUREZZA IN BIFASE SECONDO ISO/DIS4126-10

Il software qui presentato è sviluppato in ambiente Labview, ma ne è stato costruito un file ".exe" funzionante sia in ambiente Windows che Mac per un suo immediato utilizzo. Il software è dotato di un menù personalizzato per la gestione e selezione delle funzionalità implementate. La versione di programma qui presentata consente : il calcolo dello stato di aggregazione della materia in caso di thermal runaway reaction oppure di external heating e il calcolo della portata specifica scaricabile attraverso una valvola di cui si conoscano i coefficienti di efflusso in fase liquida e gas. In quest'ultimo caso, dalla conoscenza della portata da smaltire si perviene al calcolo del diametro minimo della valvola e conoscendo invece il diametro della valvola si può calcolare la portata scaricata. In generale i dati di input richiesti dal programma sono divisi in parametri termodinamici e parametri fisici

4.1. Il calcolo del regime di flusso in caso di thermal runaway reaction

I parametri termodinamici richiesti in questo caso sono la pressione di dimensionamento p0 e l'input di calore prodotto dalla reazione che si sviluppa all'interno del reattore Q_p. Questo dato dipende dalla massa totale di fluido presente, dal calore specifico della fase liquida e da una grandezza, ricavabile da preventive prove calorimetriche, che definisce l'incremento di temperatura per unità di tempo causato dalla reazione. Per la valutazione della tipologia del flusso è necessario conoscere anche i volumi specifici della fase liquida e vapore, la tensione superficiale della fase liquida, la viscosità della fase liquida e il calore latente di evaporazione: queste

cinque grandezze possono essere fornite in maniera automatica in funzione della pressione di dimensionamento e del fluido di lavoro (si stanno attualmente implementando le proprietà fisiche di numerosi fluidi industrialmente interessanti secondo le biblioteche della NIST) oppure in modalità manuale.

I parametri fisici richiesti sono invece il livello iniziale di liquido nel recipiente ϕ_0 (in percentuale) e l'area della sezione trasversale del reattore A_v.

Dalla conoscenza delle grandezze sopraelencate, il programma calcola la velocità superficiale $u_{g,0}$ della fase gassosa alla sommità del sistema pressurizzato e la velocità di risalita delle bolle u_∞ formatesi internamente alla fase liquida. Questi parametri sono utilizzati per valutare il livello di riempimento limite indicato dalla figura 1, che è stata a sua volta implementata.

La voce di menu "windows" consente l'apertura delle finestre "Input data" o "Results". La prima riepiloga i valori di tutte i parametri termodinamici e fisici immessi o calcolati automaticamente. La seconda riporta il valore delle grandezze derivate, necessarie per il calcolo del livello di riempimento limite.

La fig. 2 mostra come si presenta la pagina di programma relativa al calcolo del tipo di fase in caso di Thermal runaway reaction.

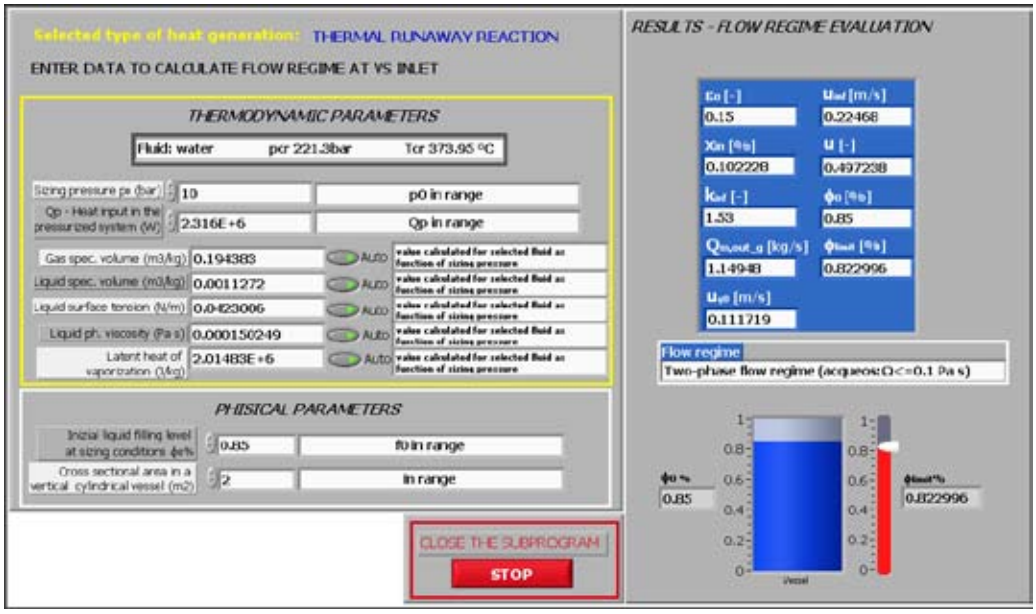


Fig. 2. – Interfaccia del software per il calcolo del tipo di fase in caso di Thermal Runaway Reaction

4.2. Il calcolo del regime di flusso in caso di External Heating

I parametri termodinamici richiesti in questo caso sono la pressione di dimensionamento p_0 e l'input di calore proveniente dall'esterno (in Watt). In caso di incendio, questo parametro dipende dal grado di isolamento del recipiente e dalla superficie interessata dalle fiamme A_{fire}. Anche in questo caso devono essere forniti (con le modalità prima esposte) i volumi specifici della fase liquida e vapore, la tensione superficiale della fase liquida, la viscosità della fase liquida e il calore latente di evaporazione.

I parametri fisici richiesti sono invece il livello iniziale di liquido nel recipiente ϕ_0 (in percentuale), la già menzionata A_{fire}, l'altezza del livello liquido nel recipiente H_l ed infine il diametro interno del recipiente in corrispondenza del bordo libero del volume del gas D.

Il processo di valutazione del tipo di flusso passa per il calcolo di q_{fire} definito come il flusso termico adimensionale dovuto all'esposizione al fuoco e trasferito all'interno attraverso la superficie A_{fire}. q_{fire} è anche funzione della velocità di risalita delle bolle nel liquido u_∞. Il livello di

riempimento limite ϕ_{limit} è determinato come funzione di q_{fire}, di H_l e di D. Ricordiamo comunque che le equazioni empiriche a cui si riferisce la normativa sono peraltro applicabili solo per recipienti verticali cilindrici senza trasferimento di calore attraverso la base degli stessi.

La fig. 3 mostra come si presenta la pagina di programma relativa al calcolo del tipo di fase in caso di External Heating.

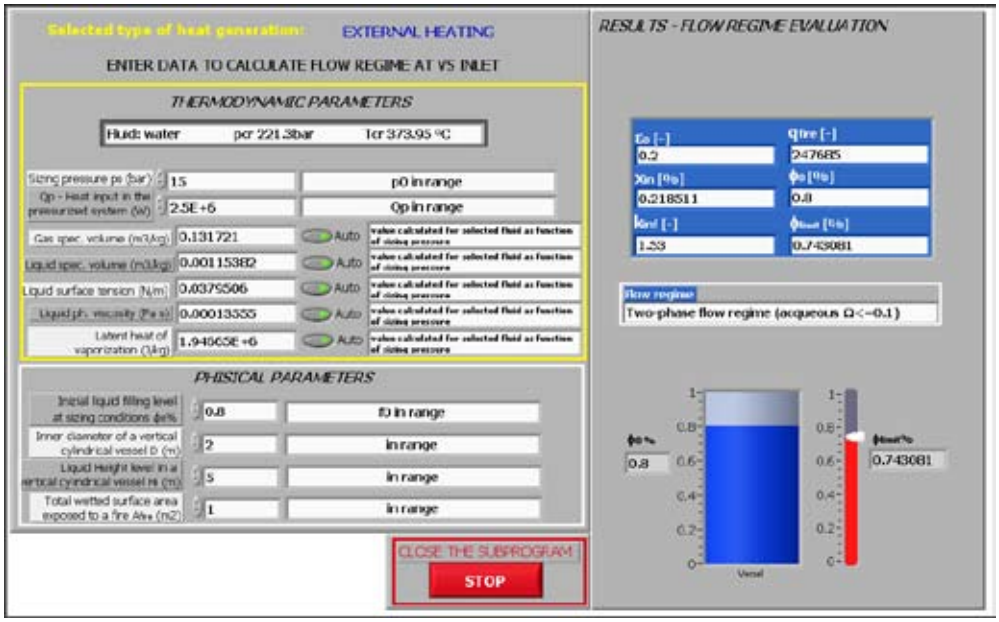


Fig. 3. – Interfaccia del software per il calcolo del tipo di fase in caso di External Heating

4.3. Il calcolo della portata specifica bifase scaricabile attraverso una valvola di sicurezza

Nel caso in cui sia stato accertata la possibilità di efflusso bifase attraverso la valvola, per il calcolo della portata specifica effluente può essere utilizzato il metodo ISO, presente nel software, caratterizzato dai parametri caratteristici introdotti nel paragrafo 3.

Il software richiede i parametri termodinamici pressione di dimensionamento p_0, contropressione alla flangia di uscita valvola p_b, il titolo in ingresso valvola di sicurezza, la temperatura del sistema pressurizzato nelle condizioni di dimensionamento T_0 (se il titolo è stato posto uguale a zero, altrimenti questo parametro viene calcolato automaticamente) e la massima pressione ammissibile p_{MAA}. Quest'ultimo parametro è un dato di progetto del recipiente in pressione e ne definisce la massima pressione sopportata. I parametri fisici da immettere sono i coefficienti di efflusso in liquido k_{dr_l} ed in gas k_{dr_g}. Infine, se si vuole calcolare il minimo diametro utile della valvola occorre fornire la portata in massa da scaricare, mentre volendo calcolare la portata da scaricare deve essere fornito il diametro minimo della valvola.

Il processo di calcolo parte dalla valutazione del fattore di compressibilità ω di equilibrio, con l'equazione (3); viene successivamente calcolato η_c tramite la (4) e quindi il parametro N con la (5). Successivamente viene ricalcolato ω ponendo N a fattore del secondo termine della (3): questo valore di ω va poi inserito nella (2) per il calcolo di G_t. Infine, moltiplicando G_t per il coefficiente di efflusso bifase si ottiene la portata specifica (in kg/(m^2 s)). A questo punto, se è nota la portata da smaltire si procede nel calcolo del diametro minimo della valvola, oppure se sono note le dimensioni della valvola si procede al calcolo della portata smaltibile attraverso essa.

Il metodo ISO qui implementato è utilizzabile sia per liquidi saturi che sotto raffreddati. In quest'ultimo caso però le relazioni forniscono dei valori per il diametro minimo molto conservative: Schmidt ha proposto in [9] un metodo più accurato per lo studio di questa situazione.

La fig. 4 riporta la pagina di programma in cui viene calcolato il diametro di una valvola dai coefficienti di efflusso noti. Nella finestra "Applicability of methods" vengono indicati i valori calcolati delle grandezze p_{red} e T_{red} che devono essere minor rispettivamente di 0.5 e 0.9: p_{red} è il rapporto tra la massima pressione raggiunta durante lo scarico (funzione di p_{MAA}) e la pressione termodinamica critica, mentre T_{red} è il rapporto tra la massima temperatura raggiunta durante lo scarico e la temperatura termodinamica critica.

Dalla figura si nota anche come nella finestra dei risultati sia possibile visualizzare le grandezze calcolate utilizzando il metodo HEM e il metodo HNE introdotti nel paragrafo 3. Nel prossimo paragrafo vedremo il confronto tra le previsioni di portata specifica calcolata con i tre metodi e i dati sperimentali rilevati presso l'impianto VASIB per diversi valori dei parametri sensibili.

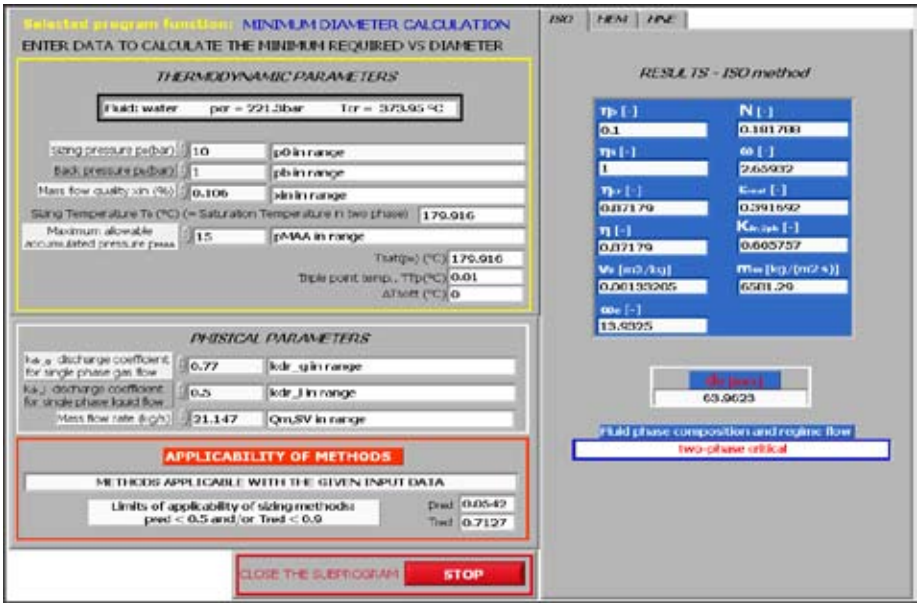


Fig. 4. – Interfaccia del software per il calcolo del diametro minimo della valvola; nella finestra dei risultati compare il metodo ISO

5. CONFRONTO TRA I METODI DI DIMENSIONAMENTO IMPLEMENTATI

Presso l'impianto VASIB del centro ricerche ENEA della Casaccia sono state condotte negli ultimi anni numerose campagne di ricerca inerenti lo studio degli efflussi bifase, in particolare attraverso valvole di sicurezza. In questo documento faremo riferimento ai tests eseguiti su tre valvole di sicurezza: due valvole aventi lo stesso diametro minimo ϕ_{or} = 10 mm e diversi coefficienti di efflusso (k_g=0.85 e k_l=0.68 per la prima, BESA, e k_g=0.56 e k_l=0.43 per la seconda, Spirax). La geometria della sezione di ingresso è leggermente convergente-divergente per la prima valvola e cilindrica per la seconda. La terza valvola è ancora una valvola Spirax avente un diametro della sezione di ingresso di 6 mm ed elevati coefficienti di efflusso(k_g=0.80 e k_l=0.77). Sono stati esaminati 83 tests compiuti sulla valvola Spirax 10mm, 80 sulla BESA 10mm e 113 sulla Spirax 6mm.

Tendenzialmente, a parità di condizioni di ingresso, il metodo HNE fornisce previsioni di portata teorica Gt superiori a quella degli altri due metodi. La portata specifica G_s è il prodotto della portata teorica G_t per il coefficiente di efflusso in bifase k_d (eq.1): per questo, anche in termini di G_s, il metodo HNE predice valori maggiori degli altri due metodi.

La fig. 5, 6 e 7 riportano l'andamento del rapporto tra portate specifiche calcolate (G_s) e reali in funzione del titolo per le tre valvole provate. Esse evidenziano come il metodo HNE predica valori di G_s maggiori degli altri due metodi, ma in certe situazioni troppo superiori al valore reale. Il metodo ISO fornisce previsioni

intermedie tra quelle degli altri due metodi. Il metodo HEM è il più conservativo in ogni caso fornendo delle sottostime anche prossime al 40%.

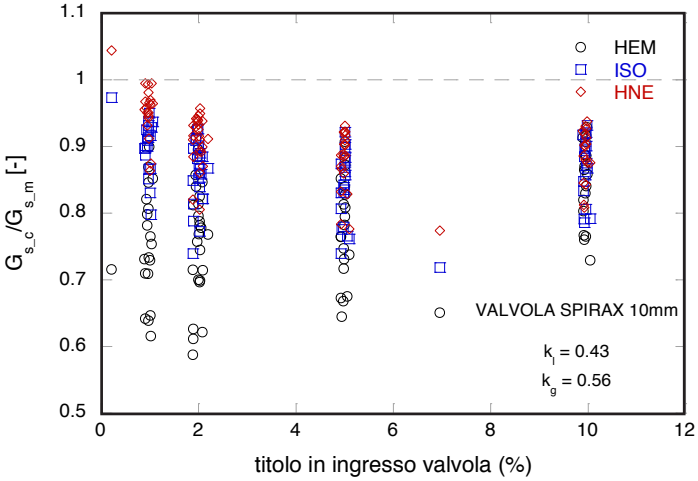


Fig. 5. – Rapporto delle portate specifiche calcolate e reali in funzione del titolo in ingresso per la valvola SPIRAX 10mm

La fig.5 è relativa alla valvola Spirax 10mm: la miglior stima di G_s da parte dell'HNE potrebbe essere dovuta alla geometria della valvola che tende ad amplificare lo stato di disequilibrio dell'efflusso, come sembrerebbero indicare i bassi valori dei coefficienti di efflusso k_l e k_g (da cui seguono valori contenuti del coefficiente di efflusso bifase). Il metodo ISO fornisce previsioni leggermente minori, a vantaggio della sicurezza del dimensionamento, in particolare a basso titolo dove l'HNE fornisce qualche sovrastima.

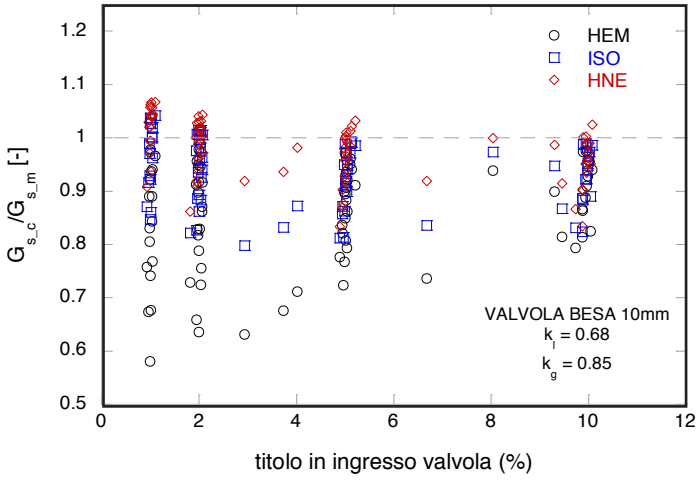


Fig. 6. – Rapporto delle portate specifiche calcolate e reali in funzione del titolo in ingresso per la valvola BESA 10mm

Per la valvola BESA (fig. 6), gli elevati valori di k_l e soprattutto k_g sembrerebbero mostrare una tipologia dell'efflusso più vicina alle ipotesi di equilibrio: in effetti l'HNE tende ad avere alcune sovrastime soprattutto a basso titolo; anche l'ISO presenta delle sovrastime di entità minore a basso titolo.

La tendenza alla sovrastima del metodo HNE cresce per la valvola Spirax 6mm (fig.7), caratterizzata da alti valori sia di k_l (che provoca alte sovrastime a basso titolo) che di k_g. Il metodo ISO presenta poche contenute sovrastime (massimo del 5%) a basso titolo, fornendo per il resto previsioni comprese tra il 0.9 e l.

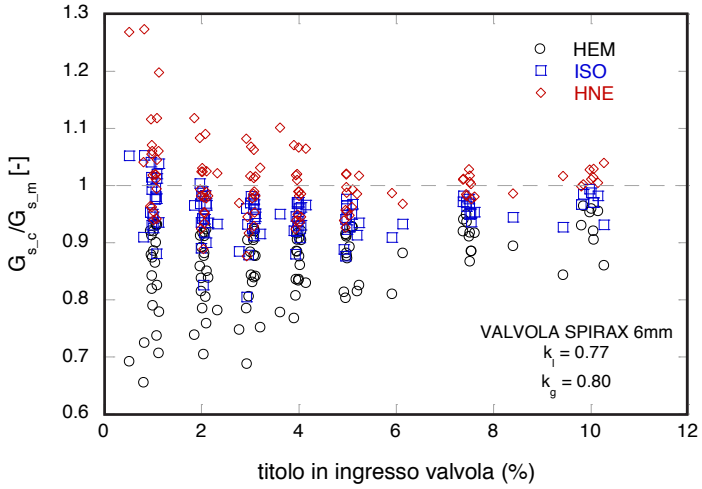


Fig. 7. – Rapporto delle portate specifiche calcolate e reali in funzione del titolo in ingresso per la valvola SPIRAX 6mm

6. CONCLUSIONI

In questo documento è stata presentata la prima versione di un software per il dimensionamento di valvole di sicurezza in bifase secondo il documento ISO/DIS4126-10. E' stata, in particolare, implementata la parte relativa alla valutazione del tipo di flusso che giunge in ingresso valvola in seguito ad una sovrapressione che ne provoca l'apertura. E' stata implementata anche la sezione relativa al dimensionamento vero e proprio, ovvero al calcolo della portata specifica che attraversa la valvola in funzione delle condizioni termodinamiche in ingresso e della geometria. Sono inoltre in fase di realizzazione le parti di programma per il calcolo della portata da scaricare in funzione della causa scatenante l'incremento di pressione e del tipo di sistema (tempered, gassy o hybrid) e quella relativa alla valutazione della caduta di pressione nell'attraversamento della valvola conoscendo la portata smaltita e le caratteristiche geometriche della valvola.

Nel paragrafo 5 è stato mostrato come il metodo proposto nel documento ISO/DIS4126-10 fornisca previsioni più conservative rispetto ai metodi di non equilibrio "puri": in particolare, in condizioni di basso titolo, dove questi ultimi presentano le sovrastime più consistenti, consente previsioni di sicurezza.

BIBLIOGRAFIA

[1]ISO/DIS4126-10, Safety devices for protection against excessive pressure – Part 10: Sizing of safety valves for gas/liquid two-phase flow, 2008

[2] H. K. Fauske, Multi-Phase Flow Considerations in Sizing Emergency Relief Systems for Runaway Chemical Reactions, Proc. 3rd Multi-Phase Flow and Heat Transfer Symposium, Miami, Florida, 1983

[3] T. Lenzing, L. Friedel, J. Cremers, M. Alhusein, Prediction of the maximum full lift safety

valve two-phase flow capacity. J. of Loss Prevention in the Process Industries, vol.11, pp. 307-321, 1998

[4] R. Diener, J. Schmidt, (2004) Sizing of Throttling Device for Gas/Liquid Two-Phase Flow Part 1: Safety Valves, Process Safety Progress, vol.23, No.4, pp. 335-344

[5] H.K. Fauske, Properly size vents for nonreactive and reactive chemicals, Chem. Eng. Prog., February 2000, pag.17-29

[6] J. Schmidt, F. Westphal, Practical procedure for the sizing of safety valves and their relief lines for the flow of vapor/liquid mixtures, Part1, Chem.-Ing.-Techn., vol.69, No.8, 1997, 1074-1091

[7] J.C. Leung, (1996). Easily size relief devices and piping for two-phase flow, Chem. Eng. Prog., 92 (12), 28-50

[8] H.G. Fisher, H.S. Forrest, S.S. Grossel, J.E. Huff, A.R. Muller, J.A. Noronha, D.A. Shaw, B.J. Tilley, Emergency Relief System Design Using DIERS Technology , The DIERS Project Manual, AIChE, New York, 1992

[9] J. Schmidt, Sizing of nozzles, venturis, orifices, control and safety valves for initially subcooled gas/liquid two-phase flow–the HNE-DS method, Forschung im Ingenieurwesen, vol.71, 2007, pp. 47-58

sessione TEMATICA
ANALISI DEI RISCHI

Dimensionamento di dispositivi di scarico di emergenza con efflusso bifase

*L. Greco**
*A. Padoan***

** Ingegnere Chimico (Ente della Zona Industriale di Porto Marghera)*
*** Ingegnere Chimico*

1. SOMMARIO

Il dimensionamento di un dispositivo di scarico di emergenza (d'ora in poi ERS, Emergency Relief Systems),richiede la determinazione della sezione di passaggio attraverso il dispositivo stesso.

Nel presente lavoro sono presentate alcune procedure semplificate di calcolo della sezione di scarico di tali dispositivi in caso di efflusso bifase liquido/vapore.

2. INTRODUZIONE

La sezione di passaggio attraverso il dispositivo deve essere tale da sfogare all'esterno del recipiente su cui è installato la quantità di materia e/o di energia trasferita accidentalmente al fluido in esso contenuto a seguito di anomalie di processo o di altre condizioni incidentali al fine di evitare aumenti incontrollati di pressione che possono portare al collasso dell'apparecchiatura:

$$A = W/G = V\rho_1/G \qquad (1)$$

in cui A è la sezione di scarico del ERS, G la portata massica specifica scaricata attraverso il ERS nelle condizioni di apertura, W è la portata massica generata a seguito dell'evento incidentale, V è la corrispondente portata volumetrica generata e ρ_1 la densità del fluido scaricato nelle condizioni di apertura del ERS.

Nel dimensionamento della sezione di scarico del ERS è fondamentale la definizione delle condizioni di eflusso, ovvero monofase (liquido o vapore/gas) oppure bifase (liquido/vapore) [1].

Per assegnate sezione di scarico e pressione di apertura del ERS, l'effetto dell'efflusso bifase è quello di aumentare G e ρ_1 rispetto al caso di efflusso monofase vapore, ma generalmente il rapporto G/ρ_1 diminuisce. Ne deriva che, per un assegnato valore di portata volumetrica, lo scarico di miscele bifase richiede sezioni superiori a quelle necessarie nel caso di efflusso monofase vapore, ovvero gli ERS dimensionati sulla base dell'ipotesi di efflusso monofase vapore risultano inefficaci a proteggere il recipiente quando si presenti un efflusso bifase.

La quantificazione della portata W da scaricare a seguito di un dato evento incidentale ("upset" di processo o per cause esterne per garantire che la pressione nel recipiente non superi un assegnato valore massimo) può essere effettuata utilizzando le equazioni di bilancio di materia ed energia che regolano la dinamica del sistema.

3. VALUTAZIONE DELLA PORTATA SPECIFICA, G

La valutazione della portata specifica G scaricata attraverso il ERS richiede un modello di flusso attraverso il dispositivo di scarico stesso. Nell'ambito di interesse risultano solitamente utilizzati modelli di calcolo che forniscono la portata specifica massima in corrispondenza delle

condizioni di efflusso critiche e, in particolare, i cosiddetti "modelli di equilibrio". In questi modelli si assume accettabile l'ipotesi che lo scarico avvenga in condizioni di equilibrio termico, meccanico e di trasporto di materia tra le fasi, mentre quando non si possa ritenere che le condizioni di equilibrio vengano raggiunte occorre tenere conto della velocità di trasporto interfase di calore, materia e quantità di moto, con notevole complicazione della modellazione, anche in presenza di significative ipotesi semplificative.

Il modello classico di equilibrio denominato HEM (Homogeneous Equilibrium Model) è scelto dal DIERS (The Design Institute for Emergency Relief Systems), organismo dell'AIChE (American Institute of Chemical Engineers), per il dimensionamento dei sistemi di scarico di emergenza.

4. DEFINIZIONE DEL TIPO DI EFFLUSSO

La determinazione della portata specifica G per il dimensionamento degli ERS deve principalmente tenere conto del regime di flusso che influenza le caratteristiche ed il comportamento della massa rilasciata in seguito all'intervento dei dispositivi di protezione. Il DIERS [2] ha sviluppato e testato metodi per lo studio della fenomenologia dell'efflusso bifase da un recipiente a seguito del rilascio da sistemi di scarico di emergenza, in funzione di tre principali regimi di flusso bifase liquido/vapore, che si differenziano in funzione della viscosità e della tendenza allo schiumeggiamento del liquido.

Questi regimi di flusso possono essere descritti come segue:

- *Bubbly*. La generazione di vapore è uniforme in tutto il volume di liquido, la separazione vapore-liquido (disengagement) è limitata; la fase continua è quella liquida, mentre la fase dispersa è quella vapore.
- *Churn Turbolent*. La generazione di vapore è uniforme in tutto il volume di liquido con grande separazione vapore-liquido; la fase continua è sempre quella liquida e la fase dispersa quella gassosa, ma quest'ultima si presenta con bolle di maggiore dimensione rispetto al regime bubbly.
- *Omogeneo*. Non si ha separazione tra fase liquida e fase vapore. La velocità di salita delle bolle rispetto al liquido è nulla.

La Tabella 1 illustra le caratteristiche dei tre regimi di flusso in termini di viscosità, tendenza alla formazione di schiuma e perdita di massa dal recipiente al termine dell'intervento del ERS.

Regime di flusso	Viscosità	Tendenza alla formazione di schiuma	Massima percentuale di svuotamento del recipiente (ovvero massima frazione di vuoto in condizioni di disengagement)
Churn-turbolent	< 100 cP	no	67%
Bubbly	≥ 100 cP	no	83%
Omogeneo	-	Si	100%

Tabella 1 - Caratteristiche dei regimi di flusso

Per stabilire se, in caso di intervento di un ERS per un dato evento incidentale, si è in presenza di efflusso monofase (liquido o vapore) oppure bifase, si riporta di seguito la procedura di calcolo prevista dal DIERS, rigorosamente applicabile ad un recipiente cilindrico verticale.

1. Data la pressione P_0 di intervento del dispositivo e la portata massica di scarico W_v per efflusso monofase gas o vapore, si determina la sezione di scarico richiesta A_v utilizzando una delle numerose correlazioni di calcolo per il dimensionamento del ERS presenti in letteratura.

2. Si determina la velocità superficiale del vapore:

$$j_{g\infty} = \frac{W_v}{\rho_g A_{CR}} \qquad (2)$$

in cui ρ_g è la densità del vapore e A_{CR} l'area della sezione retta del recipiente cilindrico.

3. Si determina la velocità di risalita delle bolle:

$$U_\infty = K \frac{\left\{\sigma g\left(\rho_f - \rho_g\right)\right\}^{1/4}}{\rho_g^{1/2}} \qquad (3)$$

in cui K è una costante numerica adimensionale (K = 1,53 per flusso churn-turbulent; K = 1,18 per flusso bubbly), σ è la tensione superficiale del liquido e ρ_f la densità del liquido.

4. Si determina la velocità superficiale del vapore dovuta al flusso (adimensionale):

$$\psi_F = \frac{j_{g\infty}}{U_\infty} \qquad (4)$$

5. Si determina la velocità superficiale del vapore (adimensionale) all'inizio dell'efflusso bifase:

$$\text{flusso churn-turbulent} \quad \psi = \frac{2\bar{\alpha}}{1 - C_0\,\bar{\alpha}} \quad (5a); \qquad \text{flusso bubbly} \quad \psi = \frac{\bar{\alpha}(1-\bar{\alpha})^2}{(1-\bar{\alpha}^3)(1-C_0\,\bar{\alpha})} \quad (5b)$$

In entrambe le espressioni, C_0 è un parametro di correlazione dei dati sperimentali (C0 = 1,0÷1,5 per flusso churn-turbulent; C_0 = 1,01÷1,2 per flusso bubbly), mentre $\bar{a}$ rappresenta la frazione di vuoto media nel recipiente $\bar{a} = (V_T - V_L)/V_T = (V_T - M_T/\rho_f)/V_T$, essendo V_T la capacità totale del recipiente e M_T la massa totale di liquido contenuto.

6. Si confrontano i valori delle velocità superficiali ottenendo il seguente criterio di scelta: se $\psi_F \geq \psi$ si ha efflusso bifase; se $\psi_F < \psi$ si ha efflusso monofase vapore. La frazione di vuoto α nelle condizioni di disengagement (separazione liquido/vapore) si determina considerando che in queste condizioni $\psi_F = \psi$ e si rielaborano le equazioni sopra riportate.

5. METODI DI DIMENSIONAMENTO DEGLI ERS PER EFFLUSSO BIFASE

L'Appendice D della norma API RP 520 Parte 1 [3] riporta metodi per il dimensionamento di valvole di sicurezza (per comodità abbreviate PSV, acronimo del termine anglosassone Pressure Safety Valves) per diversi scenari di scarico bifase liquido/vapore, riassunti in Tabella 2.

Scenario	Esempio	Sezione
Il sistema bifase (liquido saturo e vapore saturo) entra nella PSV e vaporizza. Non sono presenti gas incondensabili ([1]). Sono inclusi fluidi sia al di sopra che al di sotto del punto critico termodinamico del flusso bifase condensante	Miscela satura liquido/vapore di propano entra nella PSV ed il propano liquido vaporizza	D.2.1
Il sistema bifase (liquido altamente sottoraffreddato ([2]), in presenza di gas incondensabile o di vapore o entrambi, entra nella PSV e non vaporizza	Propano liquido altamente sottoraffreddato ed azoto entrano nella PSV ed il propano non vaporizza	D.2.1
Liquido sottoraffreddato (incluso liquido saturo) entra nella PSV e vaporizza. Non sono presenti vapori e/o gas incondensabili. In funzione della regione di sottoraffreddamento del liquido all'ingresso della valvola, il liquido vaporizzerà a monte (basso sottoraffredamento) oppure a valle (alto sottoraffreddamento) dell'orifizio di scarico	Propano liquido sottoraffreddato entra nella PSV e vaporizza	D.2.2
Il sistema bifase (gas incondensabile oppure vapore e gas incondensabile assieme a liquido sottoraffreddato o saturo) entra nella PSV e vaporizza. Presenza di gas incondensabile	Miscela satura liquido/vapore di propano e azoto entrano nella PSV ed il propano liquido vaporizza	D.2.3

Tabella 2 – Scenari di scarico bifase da una valvola di sicurezza

Le equazioni riportate nella API RP 520 Parte 1 sono basate sul metodo Omega di Leung, che è una semplificazione del modello HEM. In questo metodo è introdotto il parametro di flusso ω, che non costituisce una caratteristica fisica del fluido, ma un conveniente parametro in grado di rappresentare opportunamente il grado di comprimibilità o l'espansione della miscela bifase, attraverso la seguente relazione tra la variazione di pressione e di densità durante l'efflusso:

$$\frac{v}{v_0} = \omega\left(\frac{P_0}{P} - 1\right) + 1 \qquad (6)$$

Si verifica facilmente che questa relazione si riduce all'equazione per un fluido incomprimibile per ω = 0, mentre se ω = 1 si ritrova la legge di efflusso isotermo di un gas perfetto.

Flusso bifase fluido vaporizzante o non attraverso la PSV (rif. Sezione D.2.1 App. D API RP 520 Parte 1)

Fase 1 – Calcolo del parametro Omega, ω

Per sistemi monocomponente che vaporizzano o sistemi multicomponente che vaporizzano in un intervallo nominale di ebollizione ([3]) minore di 150°F (83°C) si utilizzano in alternativa le equazioni (7), (8) e (9):

$$\omega = \frac{x_0 v_{v0}}{v_0}\left(1 - \frac{0{,}37 P_0 v_{vl0}}{h_{vl0}}\right) + \frac{0{,}185 C_p T_0 P_0}{v_0}\left(\frac{v_{vl0}}{h_{vl0}}\right)^2 \qquad (7)$$

$$\omega = \frac{x_0 v_{v0}}{v_0 k} + \frac{0{,}185 C_p T_0 P_0}{v_0}\left(\frac{v_{vl0}}{h_{vl0}}\right)^2 \qquad (8)$$

in cui x_0 è la frazione di massa (titolo) del vapore all'ingresso della PSV; v_{v0} è il volume specifico del vapore all'ingresso della PSV [ft³/lb]; v_0 è il volume specifico del sistema bifase all'ingresso della PSV [ft³/lb]; P_0 è la pressione in ingresso alla PSV [psia] = pressione di taratura [psig] + sovrappressione ammissibile [psi] + pressione atmosferica; vvl0 è la differenza tra i volumi specifici del vapore e del liquido all'ingresso della PSV [ft³/lb]; h_{vl0} è il calore latente di evaporazione all'ingresso della PSV [BTU/lb] (per sistemi multicomponente, hvl0 è la differenza tra le entalpie specifiche del vapore e del liquido); C_p è il calore specifico del liquido a pressione costante all'ingresso della PSV [BTU/lb·R]; T_0 è la temperatura assoluta all'ingresso della PSV [R]; k è il rapporto dei calori specifici del vapore (se non è noto assumere k =1).

Per l'utilizzo delle equazioni (7) e (8), il sistema monocomponente deve essere lontano dal punto critico ([4]) (ovvero $T_R \leq 0{,}9$ o $P_R \leq 0{,}5$). Si noti che, se la temperatura di scarico è uguale alla temperatura critica, ma la pressione di scarico è, per esempio, inferiore al 50% della pressione critica, la condizione risulta verificata.

Per sistemi multicomponente che vaporizzano in un intervallo nominale di ebollizione maggiore di 150°F (83°C), sistemi monocomponente in prossimità del punto critico termodinamico o fluidi in condizioni supercritiche in flusso bifase condensante, si utilizza l'equazione:

$$\omega = 9\left(\frac{v_9}{v_0} - 1\right) \qquad (9)$$

in cui v_9 è il volume specifico calcolato al 90% della pressione P_0 all'ingresso della PSV [ft³/lb] (nella determinazione di v_9 il calcolo del "flash" dovrebbe essere eseguito isoentropicamente, ma quello isoentalpico è sufficiente).

Per sistemi che non vaporizzano: $$\omega = \frac{x_0 v_{vg0}}{v_0 k} \qquad (10)$$

in cui v_{vg0} è il volume specifico del gas o vapore o della combinazione gas/vapore all'ingresso della PSV [ft³/lb].

Fase 2 – Determinazione di flusso critico o subcritico

Se $P_c > P_a \rightarrow$ flusso critico; se $P_c < P_a \rightarrow$ flusso subcritico

in cui Pc è la pressione critica [psia] = $\eta_c \cdot P_0$; P_a è la contropressione a valle [psia]. η_c è il rapporto critico delle pressioni, ricavato dalla Fig. D-1 della API RP 520 Parte 1 oppure ottenuto dalla risoluzione della seguente espressione:

$$\eta_c^2 + (\omega^2 - 2\omega)(1-\eta_c)^2 + 2\omega^2 \ln(\eta_c) + 2\omega^2(1-\eta_c) = 0 \qquad (11)$$

che risulta ben approssimata dalla seguente correlazione esplicita [4]:

$$\eta_c = \left[1 + \left(1{,}0446 - 0{,}0093431\ \omega^{0{,}5}\right)\omega^{-0{,}56261}\right]^{\left(-0{,}70356 + 0{,}014685\ln(\omega)\right)} \qquad (12)$$

Fase 3 – Calcolo del flusso di massa specifico

Per flusso critico:

$$G = 68{,}09\,\eta_c\sqrt{\frac{P_0}{v_0\,\omega}} \qquad (13)$$

Per flusso subcritico:

$$G = \frac{68{,}09\left\{-2\left[\omega\ln(\eta_a) + (\omega-1)(1-\eta_a)\right]\right\}^{1/2}}{\omega\left(\frac{1}{\eta_a} - 1\right) + 1}\sqrt{\frac{P_0}{v_0}} \qquad (14)$$

in cui G è il flusso di massa [lb/s·ft^2]; η_a è il rapporto della contropressione $\eta_a = P_a/P_0$

Fase 4 – Calcolo della sezione richiesta per la PSV

$$A = \frac{0{,}04W}{K_d K_b K_c G} \qquad (15)$$

in cui A è sezione effettiva di scarico richiesta [in^2]; W è la portata ponderale [lb/h]; K_d è il coefficiente di scarico fornito dal costruttore della valvola (per un dimensionamento preliminare K_d = 0,85); K_b è il fattore di correzione per la contropressione fornito dal costruttore della valvola (per un dimensionamento preliminare utilizzare la Fig. D-2 della API RP 520 Parte 1; il fattore si applica solamente alle valvole bilanciate); K_c è il fattore di correzione per installazione combinata con disco di rottura a monte della PSV (K_c = 1 quando il DR non è installato; K_c = 0,9 quando il DR è installato in combinazione con PSV e la combinazione non ha valore noto).

Flusso bifase liquido vaporizzante-condizioni scarico PSV (rif. Sezione D.2.2 App. D API RP 520 Parte 1)

Fase 1 – Calcolo del parametro Omega saturo, ω_s

Per sistemi multicomponente che vaporizzano in un intervallo nominale di ebollizione minore di 150°F o sistemi monocomponente si utilizzano in alternativa le equazioni (16) e (17):

$$\omega_s = 0{,}185\,\rho_{l0}\,C_p\,T_0\,P_s\left(\frac{v_{vls}}{h_{vls}}\right)^2 \qquad (16)$$

in cui ρ_{l0} è la densità del liquido all'ingresso della PSV [lb/ft^3]; P_s è la tensione di vapore alla temperatura T_0 [psia] (per sistemi multicomponente utilizzare il valore della pressione di bolla corrispondente a T0); v_{vls} è la differenza tra i volumi specifici del vapore e del liquido alla pressione P_s [ft^3/lb]; h_{vls} è il calore latente di evaporazione alla pressione P_s [BTU/lb] (per sistemi multicomponente, h_{vls} è la differenza tra le entalpie specifiche del vapore e del liquido alla pressione P_s). Per l'utilizzo della soprascritta equazione, il sistema monocomponente deve essere lontano dal punto critico (ovvero $T_R \leq 0{,}9$ o $P_R \leq 0{,}5$).

Per sistemi multicomponente con intervallo nominale di ebollizione maggiore di 150°F oppure sistemi monocomponente in prossimità del punto critico termodinamico utilizzare la relazione:

$$\omega_s = 9\left(\frac{\rho_{l0}}{\rho_9} - 1\right) \qquad (17)$$

in cui ρ_9 è la densità [lb/ft^3] calcolata al 90% della pressione di saturazione del vapore P_s corrispondente alla temperatura T_0 di ingresso alla PSV (per sistemi multicomponente utilizzare per P_s la pressione di bolla corrispondente a T_0; nella determinazione di ρ9 il calcolo del "flash"

dovrebbe essere eseguito isoentropicamente, ma quello isoentalpico è sufficiente).

Fase 2 – Determinazione della regione di sottoraffreddamento

Se $P_s > \eta_{st} \cdot P_0 \rightarrow$ regione di basso sottoraffreddamento (la vaporizzazione avviene a monte dell'orifizio)

Se $P_s \leq \eta_{st} \cdot P_0 \rightarrow$ regione di alto sottoraffreddamento (la vaporizzazione avviene attraverso l'orifizio)

in cui η_{st}·è il rapporto delle pressioni di saturazione e di transizione

$$\eta_{st} = \frac{2\omega_s}{1+2\omega_s} \qquad (18)$$

Fase 3 – Determinazione di flusso critico o subcritico

Regione di basso sottoraffreddamento

Se $P_c > P_a \rightarrow$ flusso critico, altrimenti $P_c \leq P_a \rightarrow$ flusso subcritico

Regione di alto sottoraffreddamento

Se $P_s > P_a \rightarrow$ flusso critico, altrimenti Ps ≤ Pa → flusso subcritico (flusso tutto liquido)

in cui P_c è la pressione critica [psia] = $\eta_c \cdot P_0$; η_c·è il rapporto delle pressioni critiche, ottenuto dalla Fig. D-3 della API RP 520 Parte 1 utilizzando il valore di η_s, rapporto delle pressioni di saturazione $\eta_s = P_s/P_0$

Fase 4 – Calcolo del flusso di massa specifico

Regione di basso sottoraffreddamento

$$G = \frac{68{,}09\left\{2(1-\eta_s)+2\left[\omega_s\eta_s\ln\left(\frac{\eta_s}{\eta}\right)-(\omega_s-1)(\eta_s-\eta)\right]\right\}^{1/2}}{\omega_s\left(\frac{\eta_s}{\eta}-1\right)+1}\sqrt{P_0\rho_{l0}} \qquad (19)$$

Se il flusso è critico usare η_c per η; se il flusso è subcritico usare η_a per η, essendo η_a il rapporto della contropressione $\eta_a = P_a/P_{o=}$.

Regione di alto sottoraffreddamento

$$G = 96{,}3\left[\rho_{l0}(P_0 - P)\right]^{1/2} \qquad (20)$$

Se il flusso è critico usare P_s per P; se il flusso è subcritico (efflusso tutto liquido) usare P_a per P.

Fase 5 – Calcolo della sezione richiesta per la PSV

La seguente equazione si applica solo in caso di sistemi in flusso turbolento. La maggior parte degli scenari di scarico bifase sono in regime turbolento,

$$A = 0{,}3208\frac{Q\rho_{l0}}{K_d K_b K_c G} \qquad (21)$$

in cui Q è la portata volumetrica [gal/min].

Flusso bifase fluido con presenza di gas incondensabile (rif. Sezione D.2.3 App. D API RP 520 Parte 1)

Fase 1 – Calcolo della frazione di vuoto, α_0 $\qquad \alpha_0 = \frac{x_0 v_{vg0}}{v_0} \qquad (22)$

Per sistemi che soddisfano tutte le seguenti condizioni seguire le fasi 2.1, 3.1 e 4.1:

a. Contenuto in idrogeno inferiore dello 0,1% in peso

b. Intervallo nominale di ebollizione minore di 150°F

c. Pressione parziale della fase vapore P_{v0} inferiore al 90% della pressione totale P_0 oppure pressione parziale del gas incondensabile P_{g0} maggiore del 10% di P_0.

d. Lontani dal punto critico ($T_R \leq 0,9$ o $P_R \leq 0,5$)

Fase 2.1 – Calcolo del parametro Omega, ω

$$\omega = \frac{\alpha_0}{k} + 0,185\left(1 - \alpha_0\right)\rho_{l0}\, C_p\, T_0\, P_{v0}\left(\frac{v_{vl0}}{h_{vl0}}\right)^2 \qquad (23)$$

in cui P_{v0} è la tensione di vapore alla temperatura T_0 [psia] (per sistemi multicomponente utilizzare il valore della pressione di bolla corrispondente a T_0); v_{vl0} è la differenza tra il volume specifico del vapore, escluso qualsiasi gas incondensabile, e del liquido alle condizioni di ingresso della PSV (per ottenere il volume specifico del vapore quando è presente un gas incondensabile all'ingresso alla PSV utilizzare la pressione parziale del vapore, nota la composizione molare, e la legge dei gas ideali per calcolare il volume).

Fase 3.1 – Determinazione di flusso critico o subcritico

Se $P_c > P_a \rightarrow$ flusso critico, altrimenti $P_c \leq P_a \rightarrow$ flusso subcritico

in cui P_c è la pressione critica [psia] $P_c = \left[y_{g0}\,\eta_{gc} + \left(1 - y_{g0}\right)\eta_{vc}\right]P_0$;

y_{g0} è la frazione molare del gas in fase vapore all'ingresso (può essere determinata nota la composizione molare o con l'espressione $y_{g0} = P_{g0}/P_0$); η_{gc} è il rapporto delle pressioni critiche della fase non vaporizzante, ottenuto dalla Fig. D-1 della API RP 520 Parte 1 utilizzando il valore di $\omega = \alpha_0/k$; η_{vc} è il rapporto delle pressioni critiche della fase vaporizzante, ottenuto dalla Fig. D.1 utilizzando il valore di ω.

Fase 4.1 – Calcolo del flusso di massa

Flusso critico

$$G = 68,09\left[\frac{P_0}{v_0}\left(\frac{y_{g0}\,\eta_{gc}^2\,k}{\alpha_0} + \frac{\left(1 - y_{g0}\right)\eta_{vc}^2}{\omega}\right)\right]^{1/2} \qquad (24)$$

Flusso subcritico

E' richiesta una soluzione iterativa risolvendo simultaneamente le seguenti equazioni per η_g e η_v

$$\eta_a = y_{g0}\,\eta_g + \left(1 - y_{g0}\right)\eta_v$$

$$\frac{\alpha_0}{k}\left(\frac{1}{\eta_g} - 1\right) = \omega\left(\frac{1}{\eta_v} - 1\right) \qquad (25)$$

In cui η_g è il rapporto delle pressioni critiche della fase non vaporizzante; η_v è il rapporto delle pressioni critiche della fase vaporizzante. Si ricava:

$$\eta_v = \frac{1}{2\left(1 - y_{g0}\right)}\left\{\eta_a - y_{g0} + \frac{\omega - \sqrt{\left[\left(\eta_a - y_{g0}\right)\left(\omega - \frac{\alpha_0}{k}\right) + \omega\right]^2 - 4\,\omega\,\eta_a\left(1 - y_{g0}\right)\left(\omega - \frac{\alpha_0}{k}\right)}}{\omega - \frac{\alpha_0}{k}}\right\} \qquad (26)$$

$$\eta_g = \frac{1}{2\,y_{g0}}\left\{\eta_a + y_{g0} - \frac{\omega - \sqrt{\left[\left(\eta_a - y_{g0}\right)\left(\omega - \frac{\alpha_0}{k}\right) + \omega\right]^2 - 4\,\omega\,\eta_a\left(1 - y_{g0}\right)\left(\omega - \frac{\alpha_0}{k}\right)}}{\omega - \frac{\alpha_0}{k}}\right\} \qquad (27)$$

Flusso di massa [lb/s·ft^2]
$$G = \left[y_{g0}\,G_g^2 + \left(1 - y_{g0}\right)G_v^2\right]^{1/2} \qquad (28)$$

essendo

Fase non-vaporizzante
$$G_g = \frac{68{,}09\left\{-2\left[\frac{\alpha_0}{k}\ln(\eta_g) + \left(\frac{\alpha_0}{k} - 1\right)\left(1 - \eta_g\right)\right]\right\}^{1/2}}{\frac{\alpha_0}{k}\left(\frac{1}{\eta_g} - 1\right) + 1}\sqrt{P_0/v_0} \qquad (29)$$

Fase vaporizzante
$$G_v = \frac{68{,}09\left\{-2\left[\omega\ln(\eta_v) + (\omega - 1)(1 - \eta_v)\right]\right\}^{1/2}}{\omega\left(\frac{1}{\eta_v} - 1\right) + 1}\sqrt{P_0/v_0} \qquad (30)$$

Per sistemi che soddisfano una delle seguenti condizioni seguire le fasi 2.2, 3.2 e 4.2:
a. Contenuto in idrogeno superiore allo 0,1% in peso
b. Intervallo nominale di ebollizione maggiore di 150°F
c. Pressione parziale della fase vapore P_{v0} superiore al 90% della pressione totale P_0 oppure pressione parziale del gas incondensabile P_{g0} inferiore al 10% della pressione totale P_0.
d. Vicini al punto critico (T_R>0,9 o P_R>0,5)

Fase 2.2 – Calcolo del parametro Omega, ω

$$\omega = 9\left(\frac{v_g}{v_0} - 1\right) \qquad (31)$$

Fase 3.2 – Determinazione di flusso critico o subcritico
Se $P_c > P_a \rightarrow$ flusso critico, altrimenti $P_c < P_a \rightarrow$ flusso subcritico
in cui P_c è la pressione critica [psia] = $\eta_c \cdot P_0$; η_c è il rapporto delle pressioni critiche, ricavato dalla Fig. D-1 o dalla risoluzione dell'espressione

$$\eta_c^2 + \left(\omega^2 - 2\omega\right)\left(1 - \eta_c\right)^2 + 2\omega^2\ln(\eta_c) + 2\omega^2\left(1 - \eta_c\right) = 0 \qquad (32)$$

Fase 4.2 – Calcolo del flusso di massa

Flusso critico
$$G = 68{,}09\,\eta_c\sqrt{\frac{P_0}{v_0\,\omega}} \qquad (33)$$

Flusso subcritico
$$G = \frac{68{,}09\left\{-2\left[\omega\ln(\eta_a) + (\omega - 1)(1 - \eta_a)\right]\right\}^{1/2}}{\omega\left(\frac{1}{\eta_a} - 1\right) + 1}\sqrt{P_0/v_0} \qquad (34)$$

in cui η_a è il rapporto delle contropressioni $\eta_a = P_a/P_0$.

Fase 5 – Calcolo della sezione richiesta di scarico

$$A = \frac{0{,}04\,W}{K_d K_b K_c G} \qquad (35)$$

6. APPENDICE: DIMENSIONAMENTO DEL COLLETTORE DI SCARICO DA ERS PER EFFLUSSO BIFASE [5]

Il problema della emissione di scarichi accidentali da sistemi di sicurezza si presenta spesso nelle applicazioni industriali, segnatamente nelle raffinerie, negli impianti chimici e in quelli petrolchimici.

E' evidente che il sistema di convogliamento degli scarichi di emergenza da ERS ad un sistema di trattamento e abbattimento del relativo carico inquinante non deve introdurre alcuna limitazione od ostacolo al corretto funzionamento degli ERS. Ciò si traduce sostanzialmente nella definizione dei valori massimi di contropressione allo scarico.Nello scarico convogliato, infatti, si distinguono due tipi di contropressione:

- contropressione imposta (superimposed backpressure), che rappresenta la pressione statica esistente a valle del ERS prima del suo intervento, dovuta quindi ad altre sorgenti; quando più ERS scaricano in un medesimo collettore, la pressione "generata" da altri agisce quale contropressione "imposta" del dispositivo considerato. Conseguentemente la contropressione imposta può essere costante o variabile;
- contropressione generata (built-up backpressure), che rappresenta l'incremento di pressione statica che si verifica all'uscita del ERS provocato dall'intervento del dispositivo stesso.

Le contropressioni generate si esaltano pertanto quando:

a) sulla linea di scarico sono installati accessori quali silenziatori e rompifiamma;

b) quando vi sono restringimenti di sezione di tubo o presenza di numerose curve;

c) quando si ha eccessiva lunghezza della tubazione di scarico;

d) quando le portate di scarico sono elevate.

Nel caso di un efflusso bifase, la massima lunghezza equivalente L della tubazione di convogliamento di un dato diametro interno D (come primo tentativo si utilizza il valore corrispondente al diametro nominale della connessione di uscita del ERS) richiesta per il convogliamento della portata richiesta si ricava da bilanci di quantità di moto e risulta determinata sulla base della perdita di carico della tubazione di scarico, come di seguito riportato:

$$4f\left(\frac{L}{D}\right)_{eq} = 2\frac{P_0\rho_0}{(W/A_2)^2}\left\{\frac{\eta_1-\eta_2}{(1-\omega)} - \frac{\omega}{(1-\omega)^2}\ln\left[\frac{(1-\omega)\eta_1+\omega}{(1-\omega)\eta_2+\omega}\right]\right\} + 2\ln\left[\frac{(1-\omega)\eta_1+\omega}{(1-\omega)\eta_2+\omega}\left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right)\right] \qquad (36)$$

in cui f è il fattore di attrito di Fanning (usualmente di valore pari a 0,005 in caso di efflusso bifase); W è la portata massica scaricata; A_2 è la sezione retta di flusso della tubazione di scarico; $\eta_1 = P_1/P_0$ e $\eta_2 = P_2/P_0$ rappresentano, rispettivamente, i rapporti di pressione all'entrata ed all'uscita della tubazione di scarico.

In questo caso P_1 corrisponde al valore della massima ammissibile contropressione generata, mentre P_2 è pari al maggiore del valore tra la contropressione P_b e la pressione critica all'uscita, determinabile con l'espressione seguente:

$$P_{2c} = \frac{W}{A_2}\left(\frac{P_0\,\omega}{\rho_0}\right)^{1/2} \qquad (37)$$

Esempio applicativo: Rilascio di ammoniaca liquida vaporizzante

Una valvola di sicurezza (connessioni 1,5x2,5 in) è installata su un recipiente di processo per lo scarico di emergenza di una portata W pari a 1,22 kg/s di ammoniaca liquida satura ($x_0 = \alpha_0 = 0$) a 25°C.

La tubazione di scarico del dispositivo conduce ad un sistema di trattamento operante ad una pressione di 0,101 MPa (14,8 psia), corrispondente alla contropressione allo scarico P_b. La lunghezza equivalente della tubazione risulta pari a 20 m (66 ft).La pressione di taratura a

banco della PSV è pari a 0,814 MPa (118 psi). La pressione di scatto della PSV installata sull'apparecchio risulta quindi pari a 0,915 MPa (133 psi).

Verificare l'idoneità della tubazione di scarico in caso di efflusso bifase.

Si assume una pressione di rilascio P_0 corrispondente al 110% della pressione di scatto (P_0 = 1 MPa). Si calcola il parametro ω con la seguente espressione:

$$\omega = \frac{x_0 v_{g0}}{v_0} + \frac{C_p T_0 P_0}{v_0}\left[\frac{v_{fg0}}{h_{fg0}}\right]^2 \approx \alpha_0 + (1-\alpha_0)\rho_{f0} C_p T_0 P_0 \left[\frac{v_{fg0}}{h_{fg0}}\right]^2 \qquad (38)$$

Si noti che ω è dato dalla somma di due distinti termini: il primo è significativo del grado di comprimibilità della miscela bifase, mentre il secondo termine, dominante nel caso di fluidi soggetti a cambiamento di fase (come nel caso di fluidi che evaporano durante lo scarico), rende conto della comprimibilità dovuta all'evaporazione che si verifica a seguito della depressurizzazione. Quindi, nel caso di scarico di miscele di liquidi non volatili e gas incondensabili il parametro ω può essere approssimato al titolo di vapore volumetrico α_0.

Si assume che il diametro nominale della tubazione di scarico sia corrispondente alla dimensione nominale della connessione di uscita della PSV. Pertanto A_2 = 3,089·10^{-3} m^2 (4,79 in^2).

$$\text{Pressione critica all'uscita } P_{2c} = \frac{W}{A_2}\left(\frac{P_0\,\omega}{\rho_0}\right)^{1/2} = 5{,}14\cdot 10^4 \text{ Pa} = 7{,}6 \text{ psia}$$

Essendo $P_{2c} < P_b$ l'efflusso risulta subcritico. Quindi $P_2 = P_b$ = 0,101 MPa (14,7 psia).

Si assume una contropressisone massima ammissibile pari al 10% della pressione relativa di taratura. Pertanto P_1 = 0,1·118 psi + 14,7 psi = 26,5 psia = 0,18 MPa. I rapporti di pressione sulla tubazione di scarico risultano $\eta_1 = P_1/P_0$ = 0,183 e $\eta_2 = P_2/P_0$ = 0,101. Dall'equazione (36) si ottiene 4f(L/D) = 8,8.Posto f = 0,005 e D = 0,0627 m (2,469 in) si ricava che la lunghezza equivalente risulta pari a 28 m (91 ft).Tale lunghezza equivalente ammissibile risulta superiore alla lunghezza equivalente effettiva della tubazione di scarico e, pertanto, il piping di scarico scelto risulta adeguato. Se d'altra parte questa condizione non fosse stata verificata, si sarebbe dovuto scegliere un diametro nominale maggiore della tubazione di scarico oppure una PSV bilanciata che meno risente della contropressione e ripetuto il procedimento di calcolo sopra sviluppato fino a soddisfare il criterio della massima lunghezza ammissibile.

7. CONCLUSIONI

La valutazione della sezione del dispositivo di scarico di emergenza per efflusso bifase viene facilmente condotta utilizzando, per le diverse situazioni analizzate, la relazione (1) con le corrette espressioni per la portata da scaricare W ed il flusso specifico G. In tal modo si ottiene una stima solitamente conservativa della sezione del sistema di scarico di emergenza richiesta per proteggere l'apparecchiatura da un dato scenario accidentale.

BIBLIOGRAFIA

[1] AA.VV., "Metodi semplificati per il dimensionamento di dispositivi di scarico di emergenza con efflusso bifase", La rivista dei combustibili, n. 58, p. 46, (2004)

[1] Emergency Relief System Design Using DIERS Technology, DIERS-AIChE Project Manual, (1992)

[3] API RP 520 "Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries", Part I: Sizing and Selection, 7th Ed. (Jan. 2000)

[4] Hellemans M., "The Safety Relief Valve Handbook", Inst. Chem. Eng., Butterworth-Elsevier, (2009)

[5] Leung J. C., "Size Safety Relief Valve for Flashing Liquids", Chem. Eng. Prog., p. 70, (Feb. 1992)

NOTE

(1) Un gas in condensabile è un gas che non è facilmente condensato nelle normali condizioni operative. Esempi di gas incondensabili sono aria, ossigeno, azoto, idrogeno, anidride carbonica, monossido di carbonio e idrogeno solforato.

(2) Il termine altamente sottoraffreddato è usato per rafforzare il concetto che il liquido si trova lontano dal punto di ebollizione e non vaporizza nel passaggio attraverso la PSV

(3) L'intervallo nominale di ebollizione è la differenza dei punti di ebollizione a pressione atmosferica tra il componente più pesante e più leggero nel sistema

(4) Altre assunzioni includono: comportamento ideale del gas, calore di evaporazione e capacità termica del fluido costanti durante il flusso attraverso la valvola, tensione di vapore del fluido funzione della temperatura secondo una espressione tipo Clapeyron, flusso isoentalpico

Deterioramento dei Serbatoi Criogenici

N. Altamura* - V. Annoscia* - D. Sallustio*
** ISPESL, Dipartimento Territoriale di Bari*

SOMMARIO

Il deterioramento dei serbatoi criogenici avviene per diverse cause. Non sempre queste sono imputabili alle caratteristiche intrinseche dei serbatoi, ma vanno ricercate tra le problematiche costruttive e di utilizzazione.

I fenomeni di corrosione esterna sono facilmente riscontrabili nelle parti la cui visibilità è agevole, ma al momento non vi sono casi studio di fenomeni afferenti a corrosione interna e loro eziologia.

Oggi i sistemi di costruzione e di esercizio sono cambiati rispettivamente con il recepimento della Direttiva 97/23/CE e con l'introduzione del DM n. 329/04; questi strumenti normativi hanno acceso i riflettori sull'analisi dei rischi sia in sede di costruzione che in sede di utilizzazione, con l'obiettivo di integrare in modo appropriato i risultati ottenuti in prima istanza dal fabbricante ed in seconda battuta dai vari utilizzatori che useranno il serbatoio criogenico durante la sua vita.

Attualmente il parco italiano dei serbatoi criogenici ha un'età media di 30 anni con punte che superano i 50 anni. Questi serbatoi hanno subito diversi "primi impianti", molte verifiche periodiche, e non sempre le riparazioni sono state denunciate all'Ispesl o al vecchio ente ANCC. E' quindi giusto fissare degli obiettivi in merito a programmi di monitoraggio per serbatoi in funzione sia della loro storia che della loro età. Tra gli obiettivi si potranno individuare elementi indicatori di danno o di meccanismi di danno, con la realizzazione di limiti o di vincoli al di fuori dei quali non si potrà far esercire il serbatoio criogenico, decretandone la rimozione e il divieto non solo all'uso ma anche alla riparazione.

1. SCHEMA SEMPLIFICATO DI UN IMPIANTO CRIOGENICO

A titolo introduttivo si propone uno schema semplificato di un impianto criogenico come nella Figura 1. seguente, in cui si possono identificare i sottolelencati elementi:

- Serbatoio criogenico: formato essenzialmente da due involucri inseriti uno dentro l'altro. Tra i due involucri si crea il "vuoto" al fine di realizzare l'importantissimo isolamento.
- Linea di adduzione criogenica con la valvola V4 per l'erogazione al componente successivo.
- Riscaldatore atmosferico, denominato più come "evaporatore" che chiaramente serve a trasformare il fluido liquido freddo in fluido gassoso a temperatura prossima alla temperatura ambiente.
- La valvola VDS di sicurezza che permette al gas ottenuto di non superare la pressione massima di progetto del sistema.
- La valvola d'intercettazione VI.
- La valvola di non ritorno VNR per permettere il continuo fluire del gas nell'unico verso consentito.

L'impianto potrà essere implementato di sistema "economizzatore" che interviene qualora nel serbatoio interno si raggiungono set di pressioni superiori ad un certo valore predeterminato, facendo aprire apposite valvole che convogliano il gas nella linea di adduzione direttamente dalla testa del serbatoio interno in cui il vapore è in equilibrio con il proprio liquido a bassa temperatura; ciò avviene fino all'abbassamento della pressione con eventuale intervento del sistema naturale della messa in pressione costituito da un riduttore d'intervento ed un riscaldatore generalmente a serpentino, situato nella parte inferiore del serbatoio esterno, e quindi a contatto con l'atmosfera.

La costruzione dei serbatoi criogenici è regolamentata dalla Direttiva 97/23/CE in regime cogente dal 29.05.2002, recepita in Italia dal D. Lgs. N. 93 del 25.02.2000. In tale Direttiva uno dei pilastri fondamentali della costruzione è la fase preliminare alla progettazione, cioè quel complesso di operazioni di analisi e valutazione relativa ai pericoli e successivi rischi a corredo delle connotazioni dell'apparecchio in pressione e delle sue future utilizzazioni, in poche parole l'analisi dei rischi. Uno dei rischi maggiormente studiato attualmente è quello legato alla corrosione ed ai meccanismi corrosivi che tale tipologia di serbatoio porta a corredo con le sue funzioni e conformazione geometrica.

Purtroppo tale fenomeno se pur preso in considerazione nel passato attraverso un metodo di progettazione regolamentato dalla Legge (R.D. n. 824/1927 e Raccolta VSR dell' Ispesl), spesso non portava a risultati o conclusioni degne di nota. Contrariamente, invece, da uno studio condotto su alcuni serbatoio sottoposti a verifiche di primo impianto o di messa in servizio (DM n. 329/04) si sono riscontrati fenomeni corrosivi di diversa eziologia che su apparecchi aventi età superiori ai 30 anni hanno innescato una campagna di indagini rilevando aspetti solitamente trascurati.

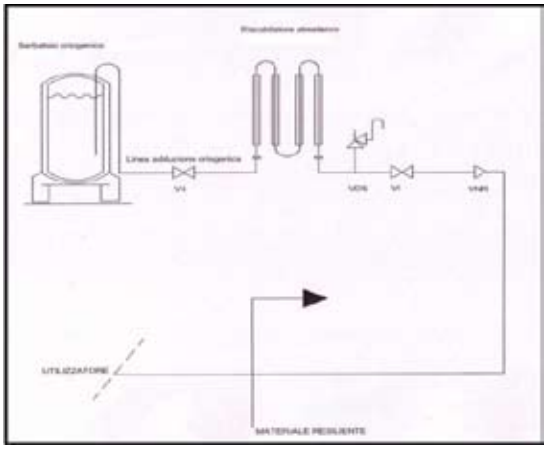


Figura 1. Schema semplificato di impianto criogenico

2. PRINCIPALI MECCANISMI DI CORROSIONE

Il pericolo è l'origine di un evento non desiderato; la sua elaborazione in termini probabilistici produce il "Rischio". E' quindi opportuno puntare l'attenzione sui pericoli di corrosione che ruotano intorno ad un apparecchio criogenico senza perdere di vista la complessità dell'intero impianto.

Inizialmente si analizzeranno i pericoli corrosivi attinenti strettamente il recipiente criogenico sia in termini progettuali che costruttivi.

Successivamente si considereranno i pericoli corrosivi relativi all'impianto di utilizzazione e la localizzazione delle centrali criogeniche.

2.1.Corrosioni del Recipiente criogenico

Riguardano la cattiva esecuzione più che la cattiva progettazione. Gli apparecchi, come si sa, sono realizzati per contenere un fluido freddo allo stato liquido sotto pressione, in modo

da poter gassificare non appena richiamati dall'utilizzatore mediante degli evaporatori che di solito sono ad aria. L'isolamento del recipiente contenitore è costituito da un recipiente esterno, fino ad oggi realizzato in acciaio al carbonio e separato da quello interno, solitamente costruito in acciaio inox, attraverso una intercapedine riempita di materiale isolante, solitamente perlite, e sottoposto al "vuoto" per completare nel migliore dei modi l'isolamento. Infatti la perlite produce un isolamento dalla "conduzione" del calore; il vuoto produce un isolamento dall'irraggiamento del calore.

La "chiusura" del sistema isolante avviene mediante le giunzioni permanenti costituite dalle saldature sia dell'involucro esterno che di quello interno. Oltre alle saldature vi sono delle connessioni che portano ad eseguire le seguenti comunicazioni ambientali:

Involucro interno/ambiente esterno;

Intercapedine del vuoto/ambiente esterno;

Involucro interno/Involucro esterno.

La prima comunicazione è quella più ricca di casi e si concretizza a causa delle connessioni dovute alle operazioni di:

- Riempimento;
- Scarico;
- Messa in pressione;
- Convogliamento economizzatore;
- Valvole di sicurezza;
- Dischi di rottura;
- Gruppo di rilievo e misura (manometri, termometri);
- Sistema del telerilevamento.

La seconda tipologia di comunicazione avviene mediante il gruppo valvole del vuoto e il disco a frattura prestabilita esistente sull'involucro esterno.

Il terzo tipo di comunicazione si materializza attraverso i supporti e gli appoggi che inevitabilmente sono presenti a collegare l'involucro interno a quello esterno.

Nelle figure seguenti, per brevità, si riportano solo pochissimi dei tanti casi di corrosione riscontrati durante le operazioni di ricerca



Figura 2. Valvola del vuoto ossidata a ridosso della connessione. Si nota accanto la valvola per la misurazione del vuoto al fine di riscontrare eventuali problematiche di tenuta

Tutte queste operazioni connetterebbero direttamente il fluido freddo con l'ambiente esterno se non fosse per il grado di tenuta degli accessori in pressione e di sicurezza montati all'esterno (valvole a sfera, valvole con otturatori, valvole di sicurezza, ecc.).Nell'ambito delle prime comunicazioni, ogni inizio di pitting o altra forma di corrosione, produce delle zone deboli



Figura 3. Scarico liquido freddo per la messa in pressione. E' il punto dove solitamente si concentrano i percolamenti delle piogge



Figura 4. Connessioni per il vuoto con bulloni ossidati e guarnizioni degradate

dal punto di vista dell'isolamento, ma anche, e soprattutto delle inevitabili aree di diffusione corrosiva che potrà manifestarsi anche in aree non a vista e non facilmente raggiungibili dalle normali procedure di manutenzione. Spesso queste corrosioni nascono proprio a ridosso delle giunzioni saldate fra i tronchetti degli accessori in pressione e i bocchelli dell'apparecchio interno; la differenza di materiali (compreso quello d'apporto) e le cattive condizioni ambientali e di esecuzione, unita alle condizioni d'esercizio esterne ed interne, producono il terreno fertile per l'innesco della corrosione. Infatti i meccanismi corrosivi possono essere accelerati in ambienti con pH basso o troppo alto (a ridosso di impianti industriali con processi chimici particolari); in ambienti con sviluppo di ioni Cl- (in vicinanza di zone costiere); in presenza di piogge costanti ricche di acidi; in presenza di impianti di utilizzazione che percorrono tratti interrati senza una adeguata protezione da fenomeni corrosivi (anche una banale canna di scarico di fogna nera che presentando rotture produce dispersioni di acido nitrico). Non è escludibile anche un altro



Figura 5. Valvola per il vuoto chiusa in cassetto

fenomeno legato alla costruzione dell'apparecchio in pressione. Il serbatoio interno eseguito in inox generalmente è sottoposto ad un processo di decapaggio e passivazione che se eseguiti male producono degli effetti devastanti non appena si generano celle galvaniche fra le parti interne e quelle esterne al serbatoio stesso. Il passivante lavato male diviene in realtà un acceleratore di fenomeni corrosivi, soprattutto per quei serbatoi interni che conterranno ossigeno.

I fenomeni corrosivi attinenti l'intercapedine del vuoto sono causati sia dalla presenza di celle galvaniche facilmente riscontrabili all'esterno del serbatoio in acciaio al carbonio, e sia dalla ossigenazione differenziata a cui le pareti di quest'ultimo serbatoio sarebbero sottoposte. Infatti la presenza del vuoto dal un lato e la pressione dell'atmosfera dalla parte esterna producono i noti fenomeni di corrosione che hanno una rapidità di progressione molto elevata. La perlite situata all'interno dell'intercapedine in teoria non dovrebbe produrre ambienti chimicamente sbilanciati in quanto in condizioni ambiente sviluppa un pH pari a 7. E' evidente che eventuali



Figura 6. Inizio di pitting sulle giunzioni saldate impianto rimessa in pressione

infiltrazioni di acqua sotto forma di umidità, altereranno tale equilibrio con la realizzazione di possibili ambienti acidi (allo scopo sarebbe opportuno utilizzare dei sali idrofobi).

Il fenomeno della ossigenazione differenziata potrebbe però causare problemi anche al serbatoio interno. In effetti per quelli destinati a contenere sostanze come azoto o argon non dovrebbero insorgere fenomeni corrosivi, ma per quelli che hanno contenuto o contengono Ossigeno i problemi sono identici, se non addirittura più accentuati di quelli del serbatoio esterno, a causa delle elevate concentrazioni di ossigeno presenti dal lato interno del serbatoio in inox e l'assenza quasi totale di aria nell'intercapedine del vuoto.

La terza comunicazione è costituita da elementi di connessione in metallo per permettere in centraggio sia verticale che orizzontale del serbatoio interno rispetto a quello esterno. Solitamente questi elementi sono in acciaio al carbonio saldati da entrambi i lati e quindi in funzione del tipo di saldatura e della bontà dell'esecuzione possono nascere delle celle galvaniche con pericolosissime corrosioni che innescano fenomeni immediati di tensocorrosione e di successive fratture e collassi localizzati con cedimenti strutturali aventi conseguenze disastrose anche sull'impianto di adduzione. È quindi importantissimo utilizzare dei procedimenti di saldatura qualificati ad acta per tali connessioni, con l'esplicitazione chiara sia della natura dei due metalli (inox e acciaio al carbonio) base da unire e, soprattutto, dei materiali d'apporto da utilizzare, nonché le condizioni ambientali in cui tali saldature devono avvenire (per esempio è fortemete sconsigliata la realizzazione della saldatura in giornate molto umide).



Figura 7. Inizio di pitting sulle giunzioni saldate delle staffe interne di ancoraggio fondo

3. CONCLUSIONI

È d'obbligo dichiarare come al momento lo studio intrapreso non è ancora terminato; ma è anche vero che si è a buon punto. Al fine di rendere statisticamente accettabile lo studio, si vogliono approfondire le percentuali e le casistiche di fenomeni corrosivi senza fermarsi ai soli casi studiati, in modo da poter presentare i risultati in modo organico in un prossimo appuntamento del settore o su riviste specializzate.

Considerando che la tecnologia di tali apparecchi è abbastanza datata (circa 50 anni), risulta già importante il poter asserire come tali fenomeni corrosivi, essendo diffusi sia all'interno del serbatoio criogenico quanto all'esterno, inducono a far pensare ad un nuovo approccio progettuale che coinvolga sia la struttura di supporto del serbatoio interno rispetto a quello esterno e sia la realizzazione di metodi alternativi di isolamento che possano prevedere altre tipologie di serbatoi esterni, con l'eventuale utilizzo di altri materiali, diversi dall'acciaio al carbonio.

sessione POSTER

1
L'approccio Risk Management nei processi di manutenzione per il monitoraggio delle attrezzature a pressione

*F. Giacobbe**
*A. Scaglione** - S. Guarnaccia***
*D. Geraci*** - L. Monica*** - M. Madonna****

** ISPESL Dip. di Messina*
*** Raffineria di Milazzo*
**** ISPESL DTS*

1. SOMMARIO

I processi di manutenzione delle attrezzature a pressione, nell'ambito delle attività produttive di una raffineria, assumono un ruolo strategico ed hanno lo scopo, non solo di garantire continuità operativa (affidabilità delle apparecchiature presenti in impianto), ma principalmente di assicurare il mantenimento del grado di rischio a livelli accettabili attraverso una politica della sicurezza finalizzata alla prevenzione di possibili conseguenze negative in caso di perdita di fluido dall'attrezzatura a pressione.

Questi due aspetti (sicurezza ed affidabilità) sono efficacemente monitorati con l'adozione del metodo Risk Based Inspection (RBI), che consiste in specifiche attività ispettive in funzione delle reali condizioni operative delle apparecchiature, così da permettere una pianificazione degli interventi manutentivi che, a seguito delle attività di riparazione, possano ripristinare condizioni ottimali di operatività.

A supporto dell'RBI , che permette di ridurre le probabilità di accadimento, in una logica più ampia dell'analisi del rischio, si colloca la gestione delle inaffidabilità impiantistiche e di processo e dei quasi incidenti. Logica che mira a superare la mera attuazione degli ordinari adempimenti legislativi così da consentire una valorizzazione delle esperienze e una conseguente caratterizzazione delle tipologie, estensione e frequenza delle azioni manutentive, in linea ad un approccio di tipo sistemico quale quello previsto dal Risk Management. Secondo tale metodica, infatti, è possibile intervenire sull'intera gestione dell'organizzazione per conseguire una strategia operativa moderna ed innovativa nelle operazioni di manutenzione.

2. IL PROCESSO DI MANUTENZIONE

Nell'attuale contesto industriale, caratterizzato da un'elevata complessità dei sistemi tecnologici, emerge sempre più l'esigenza di affidabilità e disponibilità degli impianti per far fronte ad un mercato in cui diventano più stringenti i requisiti di flessibilità, tempestività e qualità della produzione.

In questa ottica il servizio di manutenzione rappresenta, all'interno delle organizzazioni aziendali, un elemento chiave di gestione: non più un semplice servizio tecnico bensì un complesso di attività che siano in grado di ottimizzare non solo gli aspetti tecnici, ma anche quelli di tipo economico ed organizzativo.

Funzione prioritaria del servizio di manutenzione, inoltre, non può essere solo quella di garantire la massima produttività, ma diventa essenziale l'aspetto del mantenimento in piena efficienza delle macchine e degli impianti al fine di salvaguardare la salute e la sicurezza dei lavoratori e per limitare i costi sociali dovuti agli incidenti che possono derivare da malfunzio-

namenti e/o guasti. Si rende quindi necessario sviluppare un approccio strutturato e sistemico che si ponga l'obiettivo di adottare mirate politiche manutentive. Queste possono essere di tipo preventivo, cioè programmato per i componenti critici per la sicurezza o per l'impatto ambientale, di tipo predittivo o "on condition" per quelli con riguardo alla produttività, oppure a carattere correttivo, limitatamente ai componenti di scarsa criticità.

Specificatamente nell'ambito delle attività di manutenzione di tipo preventivo sta assumendo un ruolo rilevante, soprattutto nell'industria di processo, una programmazione delle ispezioni/manutenzioni basata sulla valutazione del rischio.

In questo contesto viene sempre più adottato un approccio di tipo Risk Based Maintenance (RBM), che ha permesso di sviluppare metodologie e tecniche di manutenzione/ispezione in cui il livello di rischio diventa il parametro in base al quale viene formulato il piano manutentivo relativo a ciascun componente.

Una delle metodologie che utilizzano questo principio è la Risk Based Inspection (RBI) in quanto gli intervalli manutentivi sono stabiliti in funzione della effettiva criticità dei componenti, consentendo così di migliorare la sicurezza dei lavoratori e allo stesso tempo di ottimizzare i costi dei piani di ispezione/manutenzione.

3. IL PROCESSO DI MANUTENZIONE NELL'OTTICA DEL RISK MANAGEMENT

L'approccio RBM e specificatamente la metodologia RBI, forniscono un modo di operare basato su una logica di sistema che pertanto è possibile inquadrare le problematiche relative ai processi manutentivi, ai controlli, al monitoraggio ed alle ispezioni, secondo un flusso più ampio riconducibile ad una visione di tipo integrato propria del Risk Management.

La definizione di Risk Management, inteso come "gestione integrata dei rischi in azienda, mediante un processo sistematico di identificazione, valutazione trattamento, comunicazione e riesame dei rischi stessi" ci permette di tracciare un percorso logico dove inserire opportunamente le varie fasi di applicazione, delle metodologie e dei modelli di gestione di tipo affidabilistico specifici delle attività di manutenzione nell'ambito di una industria di processo.

Attraverso questo percorso, quindi, sarà possibile razionalizzare in modo più efficace la frequenza e l'invasività degli interventi ispettivi/manutentivi sugli impianti, in quanto saranno eliminate quelle operazioni considerate inefficaci e/o non necessarie; ciò potrà garantire migliori condizioni in termini di efficienza operativa del sistema considerato e renderà possibile raggiungere maggiori e più significativi benefici nell'ottica della riduzione dei rischi e congiuntamente anche dei costi di gestione.

4. RISK BASED INSPECTION

Attualmente l'API (*American Petroleum Institute*) 580 recommended practice "Risk based inspection" e l'API publication 581 "*Risk based inspection, Base Resource Document*", rappresentano il principale riferimento per una adeguata applicazione della metodologia.

L'RBI è strutturato secondo il seguente schema (tratto dall'API 580), suddiviso in fasi. (vedi figura 1).

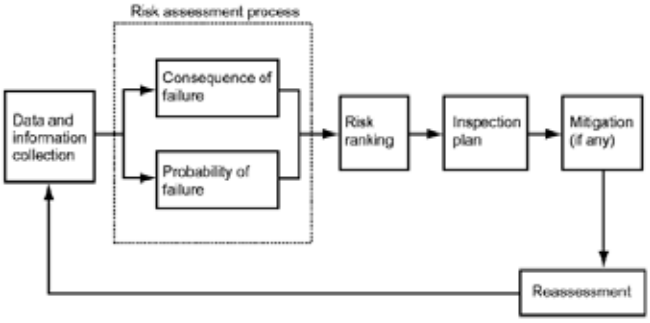


Figura 1 – Logica di base del metodo Risk Based Inspection (RBI)

La metodologia richiede una fase preliminare di raccolta dati affidabilistici e di informazioni in modo sufficientemente dettagliato ed il più possibile aderente all'impianto in esame.

Successivamente si procede ad una analisi del rischio con applicazione delle tecniche previste in tale ambito (FMECA, FTA, etc.).

Infine viene definita una mappatura o matrice delle criticità per ciascuna delle quali verrà individuato uno specifico piano di ispezioni/manutenzioni (definizione del programma di ispezioni/manutenzione con definizione delle tipologie di interventi e della periodicità). Sulla base di criteri di accettabilità del rischio si individuano gli eventi critici, quelli non critici o quelli su cui si rende necessario effettuare valutazioni più approfondite. In tal modo si riesce a classificare le attrezzature in Alto, Medio e Basso rischio di ispezione.

Infine si procede al processo di mitigazione, nel quale vengono messe in atto eventuali azioni per intervenire sui due parametri propri degli aspetti del rischio: frequenza di accadimento e magnitudo delle conseguenze.

Al fine di migliorare l'efficacia dei programmi di ispezione/manutenzione, si interviene con un riesame generale nel quale vengono rimodulati gli steps precedentemente sviluppati. Sulla base degli esiti che derivano da tale riesame è possibile aggiornare i dati di processo (ratei di guasto, intervalli di manutenzione, riparazioni effettuate) che diventeranno gli input di una successiva in un processo di tipo iterativo.

5. APPROCCIO SISTEMICO PER LE ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE IN RAFFINERIA

Una raffineria di petrolio opera a ciclo continuo e dunque l'affidabilità impiantistica riveste un ruolo strategico di primaria importanza.

Il Turn Around Maintenance (TAM) consiste in una serie di attività manutentive strategiche sia cicliche, sia straordinarie, eseguibili programmando la fermata totale (o parziale) del processo produttivo.infortuni gravi che al 2009 risultano 2. Analogamente l'indice di frequenza è passato da 5,5 nel 2005 a 1,66 nel 2009 con una riduzione del 69%. Gli infortuni si sono ridotti anche in termini di gravità. L'indice di gravità per la Divisione GEM nel periodo 2005 – 2009 si è ridotto del 47%.

Per quanto riguarda i lavoratori delle imprese appaltatrici impegnate in lavori per la Divisione GEM, il numero di infortuni dopo un incremento nel biennio 2006 – 2007, risulta in calo. Nel 2009 si sono registrati 36 casi, di cui 3 gravi e nessun infortunio mortale – fig 7a, fig. 7b. L'obiettivo è ottimizzare in modo sistemico frequenza e durata degli interventi di manutenzione e sfruttare l'opportunità della fermata programmata per espletare le attività d'investimento, le migliorie e le modifiche che altrimenti avrebbero richiesto ulteriori fermi impianto.

Le operazioni di TAM sono strutturate secondo i principi del "*Integrated Operative Method*", garantendo la qualificazione e la quantificazione ottimale delle risorse necessarie per le attività previste nello scopo del lavoro, nel rispetto dei tempi e del budget.

Tali attività si articolano in tre fasi:

- Pre-fermata: in questa fase vengono analizzate tutte le informazioni disponibili per sviluppare piani operativi e programmi esecutivi e per la valutazione della possibile entità degli imprevisti;
- Fermata: vengono effettuate tutte le attività previste, oltre a quelle supplementari che, eventualmente, emergono in seguito ai lavori eseguiti sulle apparecchiature;
- Post-fermata: con gli impianti nuovamente in servizio, vengono effettuati tutti i controlli per verificare il raggiungimento delle performance attese.

La pianificazione degli interventi manutentivi sulle attrezzature a pressione assume diversi aspetti in funzione degli output:

a) Logica 5Y (definizione costi / investimenti) [periodo: 5 anni]

b) Frequenza turn around (importanti interventi di ripristino affidabilità impianto – attività di revamping) [periodo: 4 / 5 anni]

c) Fermate di esercizio programmate (es. rigenerazione/sostituzione catalizzatore) [periodo: 12/24 mesi]

Le fermate di turn around sono determinate ed influenzate da:

- evidenze ispettive in esercizio
- investimenti per incremento/ripristino efficienza impianto

- miglioramenti sicurezza (es. cambio metallurgia, ripristino refrattario, rivestimenti anti-corrosione)
- riparazioni o sostituzioni attrezzature
- adempimenti scadenze di legge

Le fermate di esercizio programmate sono caratterizzate da:

- piccoli interventi di riparazione
- riparazioni provvisorie
- adempimenti e scadenze di legge

Il fattore "miglioramenti sicurezza" che è significativo nell'ambito delle fermate di tour around è funzione dei seguenti parametri:

1. Esito analisi RBI (ridefinizione delle tipologie, estensione e frequenza dei controlli)
2. Storicizzazione eventi attrezzatura (es. report di controlli non distruttivi)
3. Accident e Near accident
4. Evoluzioni tecnologiche dei materiali/processi (si utilizzano come dati di ingresso i fattore 1), 2) e 3) sopra citati. I dati vengono elaborati dall'area tecnica (ingegneria e tecnologia) tenendo conto anche dei suggerimenti del licenziatario dell'impianto.

Per gestire i suddetti parametri vengono utilizzati appositi e dedicati applicativi software che permettono, attraverso la regolare attuazione del *data entry*, di conoscere in tempo reale proiezioni future di interventi / scadenze sulle singole attrezzature.

I fattori 1) e 2) vengono gestiti attraverso il software CREDO che opera attraverso una registrazione degli eventi ed una programmazione delle attività future.

Il fattore 3) viene controllato mediante un applicativo che registra i singoli eventi (incidenti o quasi incidenti) ed attiva un processo di valutazione con conseguenti interventi al fine di evitare il ripetersi dell'accaduto.

Il fattore 4) viene gestito con un ulteriore applicativo con funzione di data base in riferimento alle modifiche impiantistiche.

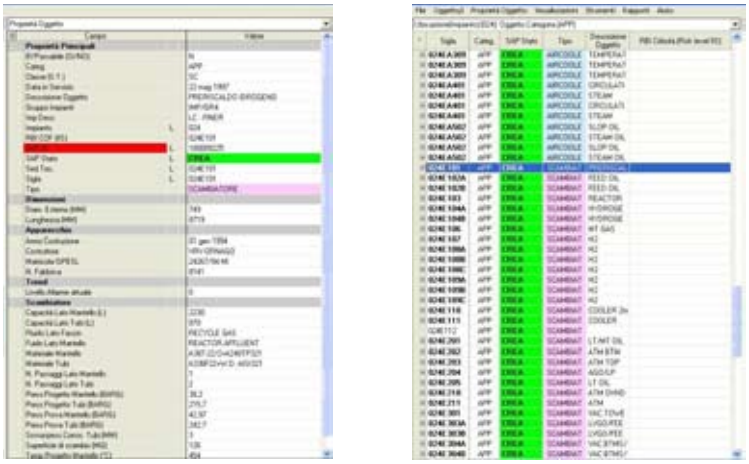


Figura 2 – Esempio di applicativo software utilizzato per il Risk Management

6. CASE STUDY

Si riporta di seguito un esempio di matrice di rischio, elaborata in conformità allo standard API 581, revisionato in base ai risultati delle ispezioni condotte durante una fermata generale di impianto.

Dalle tabelle sopra riportate si evince che nella proiezione temporale relativa allo stato corrente nessun item dell'impianto risulta in condizioni di ALTO RISCHIO.

Con riferimento alla proiezione all'anno 2014, in assenza di interventi di ispezione, si nota che 4 items risulterebbero posizionarsi in condizioni di ALTO RISCHIO.

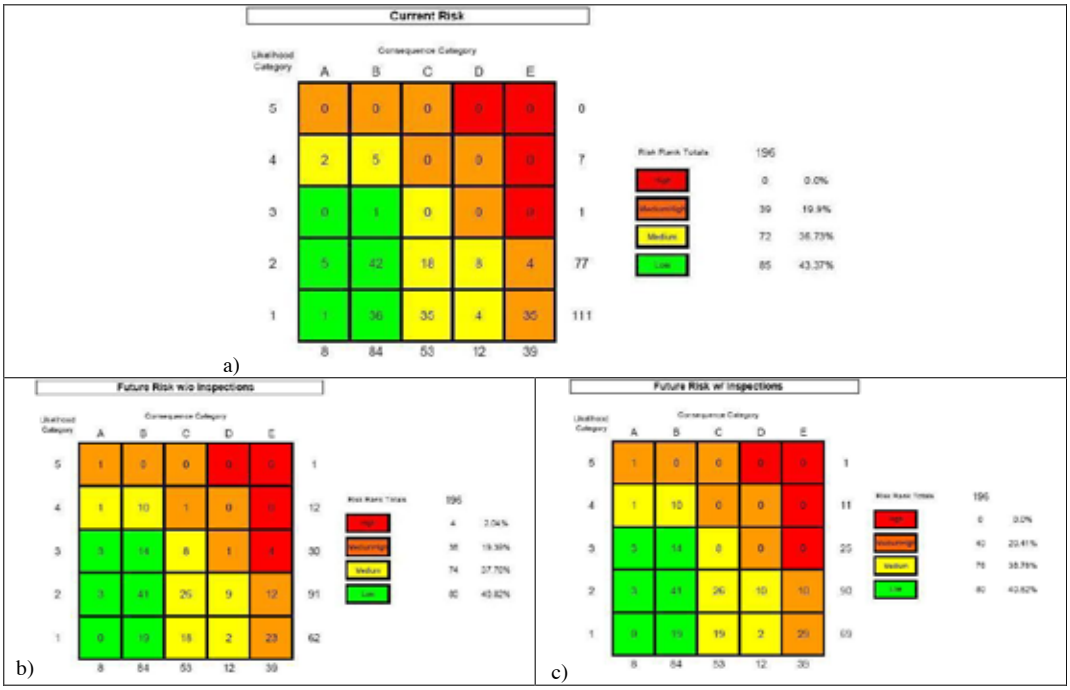


Figura 3 – Matrice di Rischio RBI. Caso a) condizione attuale; caso b) condizione futura senza variazioni al piano ispettivo; caso c) condizione futura con revisione del piano ispettivo attuale

Rivedendo la proiezione all'anno 2014, alla luce degli interventi ispettivi previsti per l'anno 2012, si osserva nuovamente che nessun item si posiziona nella fascia ad ALTO RISCHIO; questo perché, adottando una strategia ispettiva idonea, come quella individuata dalla analisi RBI, si ottiene una mitigazione degli items ad ALTO RISCHIO.

7. CONCLUSIONI

La logica dell'approccio risk management consente un attento e continuo monitoraggio dei fattori principali che hanno influenza sulla manutenzione ed hanno lo scopo di abbassare i diversi livelli di rischio. Le diverse metodologie adottate (es. RBI) instaurano un processo virtuoso di miglioramento in quanto, basandosi su dati ed esperienze storiche, consentono di programmare interventi manutentivi che sono in linea con le scadenze legislative e le esigenze di processo, sotto l'aspetto sicurezza e produzione.

Particolare attenzione deve essere prestata ai limiti ed al campo di applicazione di questo tipo di metodologie, in quanto una non corretta ed opportuna gestione degli output che ne derivano, può influenzare negativamente i risultati di miglioramento che si vogliono ottenere.

Si ritiene, in funzione dell'esperienza ad oggi acquisita, che lo stato di implementazione e evoluzione delle metodiche di Risk Management non possono soddisfare in modo autonomo il complesso ed ampio mondo della raffinazione petroli, ma esse devono essere costantemente aggiornate ed affiancate dall'esperienze in campo.

Rimane fondamentale l'esperienza e l'attività di ispezione condotta dal personale interno che, con un'attenta e costante analisi degli effetti del processo sulle attrezzature permette di conoscere e valutare i livelli di degrado e le possibili soluzioni per esercire in sicurezza. Tali esperienze diventono successivamente ingresso (processo virtuoso di feedback) per ulteriori future rielaborazioni delle pianificazioni interventi ed ispezioni utilizzando gli output di un nuovo ed aggiornato RBI.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] API 580, “Risk Based Inspection, API Recommended Practice”, Maggio 2002

[2] API 581, “Risk Based Inspection Base Resource Document”, API Publication, Maggio 2000

[3] API 510 “Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration”, API Publication, Giugno 2006

[4] API 570 “Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems”, API Publication, Novembre 2009

[5] F. Giacobbe, D. Geraci, L.. Monica “I sistemi di gestione e gli adempimenti sull’esercizio delle attrezzature a pressione, Atti convegno Safap 2008

[6] A. Carpignano, C.Vivalda: “Dalla manutenibilità alla manutenzione”, Manutenzione, Tecnica e Management, Aprile 2005, pp.1-8

2
Impianti frigoriferi, di condizionamento e di climatizzazione costruiti ed eserciti in conformità al D.Lgs. 93/2000 (PED), al DM 329/04 e al D.Lgs. 81/2008 mod. D.Lgs. 106/09

V. Nastasi - G. Argento**

** Ispesl Dip.to di Palermo*

1. SOMMARIO

I gruppi frigo sono i componenti essenziali degli impianti di refrigerazione,di condizionamento e di climatizzazione (estiva) . Essi i si compongono a loro volta da:

- recipienti in pressione (condensatori, evaporatori, separatori d'olio, ricevitori di liquido, ecc.);
- accessori (valvole di sicurezza, pressostati, termostati, regolatori di livello, dispositivi di misura e controllo);
- le tubazioni di collegamento tra le varie attrezzature componenti l'impianto ;
- alcuni tipi di compressori (ermetici e semermetici in categoria di rischio PED > 1).

In relazione a ciò, il fabbricante che costruisce e commercializza un gruppo frigo di cui sopra, destinato a funzionare cosi come è stato assemblato (INSIEME IN PRESSIONE), deve soddisfare le disposizioni della direttiva di prodotto europea 97/23/CE (PED) recepita in Italia dal D.Lgs. 93/2000.

Una volta installati sul luogo di impianto, l'Utilizzatore deve seguire il DM 329/04 che regola l'esercizio delle attrezzature e/o insiemi in pressione; sia quelli realizzati in conformità alla direttiva PED (dal 30 maggio 2002), sia quelli realizzati secondo le norme antecedenti la direttiva PED.

Inoltre se il luogo di installazione è un luogo di lavoro ai sensi del D.Lgs. 81/2008 mod. ed int. dal D.Lgs 106/09, i suddetti impianti sono delle attrezzature di lavoro e a tutti gli effetti . Pertanto essi devono seguire il Capo I del Titolo III del Testo Unico di Sicurezza e Salute prima evidenziato, prevedendo tra l'altro i relativi **controlli iniziali, controlli periodici** e **verifiche periodiche**. Alla luce di un modo di procedere da parte degli installatori/frigoristi non sempre rispettoso delle leggi vigenti, con tale memoria gli autori vogliono fornire in modo essenziale ma puntuale le procedure per una corretta progettazione, costruzione, immissione sul mercato e utilizzazione degli impianti in questione, visti come insiemi a pressione , sia nei luoghi di vita che di lavoro.

2. GENERALITÀ

Per **impianto di refrigerazione** si intende l'impiantistica " del freddo" che attua un processo mediante il quale la temperatura di un ambiente confinato viene abbassata al di sotto di quella "esterna" all'ambiente stesso (definizione del Ministero dello Sviluppo Economico con nota del 2-10-2008) . Rientrano in tale campo le celle frigorifere, la refrigerazione di serbatoi per vinificazione, le piste di pattinaggio sul ghiaccio e simili, impianti di surgelazione o raffreddamento per supermercati, ecc. . Non rientrano in tale casistica gli impianti di climatizzazione dei luoghi di vita e di lavoro.

Per **impianto di condizionamento**, si intende un impianto mediante il quale vengono modificati i parametri di temperatura, umidità relativa, velocità dell'aria, al fine di migliorare il benessere delle persone o di garantire condizioni adatte alla corretta operatività di apparecchiature

o alla conservazione di opere d'arte, dei cibi, ecc. (definizione del Ministero dello Sviluppo Economico con nota del 2-10-2008) .

Per **impianto di climatizzazione** si intende un impianto che, in ogni periodo dell'anno e con qualsiasi condizione climatica esterna, consente di mantenere in un ambiente confinato condizioni termoigrometriche adeguate al suo impiego da parte dell'uomo (definizione del Ministero dello Sviluppo Economico con nota del 2-10-2008) . Rientrano in tale categoria gli impianti di climatizzazione centralizzati per stabili di media grandezza o alta cubatura come centri commerciali, fabbricati destinati ad uffici, cliniche, ospedali, mense, ecc. .

Si sa che un ciclo termodinamico è costituito da una serie di trasformazioni operate su un fluido in modo tale che esso torni alle condizioni iniziali di pressione, volume e temperatura.

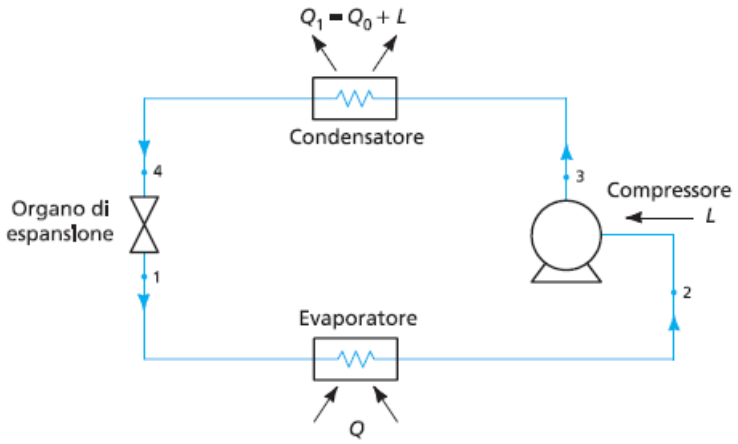
Le trasformazioni comportano scambi di calore tra il fluido e l'esterno; se il ciclo termodinamico trasforma il calore in lavoro esso viene denominato **ciclo diretto**; se invece il ciclo termodinamico serve per trasferire calore da un corpo a temperatura più bassa ad un altro a temperatura più alta esso è denominato **ciclo inverso**.

Per poter realizzare un ciclo inverso, in base al secondo principio della termodinamica, occorre somministrare lavoro meccanico al fluido. Se il ciclo inverso si realizza per sottrarre calore da un ambiente che deve essere mantenuto a temperatura più bassa della temperatura esterna, esso viene denominato ciclo **frigorifero.**

Nella realizzazione di un ciclo inverso il fluido sostanzialmente circola in quattro organi separati che formano un circuito chiuso. Tali organi sono:

1. uno scambiatore di calore o evaporatore in cui il fluido a temperatura più bassa riceve calore dall'ambiente freddo;
2. un organo (compressore) in cui si somministra energia meccanica al fluido per comprimerlo ed elevarne la temperatura e per farlo circolare nei vari organi dell'impianto;
3. uno scambiatore di calore (condensatore) in cui il fluido a temperatura più elevata cede calore all'ambiente caldo;
4. un organo di espansione in cui il fluido espande passando da una pressione maggiore ad una pressione più bassa diminuendo la propria temperatura.

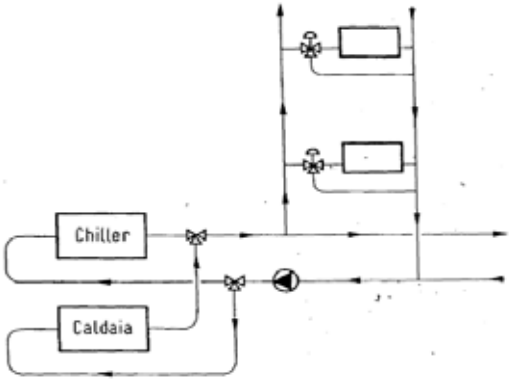
Si riporta sotto uno schema di un impianto di refrigerazione.



L'impianto di cui sopra utilizza trasformazioni ad una pressione massima ammissibile (PS) di gran lunga superiore ai 0,5 bar e di conseguenza rientrano nel campo della direttiva 97/23/CE (PED) recepita in Italia con il D.Lgs. 93/2000.

In relazione a ciò gli **impianti frigoriferi e di condizionamento** hanno alla base dei gruppi frigo che rientrano a tutti gli effetti nella direttiva PED.

Per quanto riguarda gli **impianti di climatizzazione**, occorre sottolineare che alla base di tali impianti abbiamo: un impianto frigo (per climatizzazione estiva) e una caldaia (per climatizzazione invernale) . Sotto si riporta in modo schematico un impianto di climatizzazione estivo-invernale.



3. APPLICAZIONE DEL D.LGS. 93/2000 (DIRETTIVA PED)

La direttiva europea 97/23/CE, meglio nota come PED (Pressure Equipment Directive) recepita in Italia con il D.Lgs. 93/2000, si applica alle attrezzature a pressione ed agli insiemi con PS > 0,5 bar,cioè a quegli impianti costruiti da un Fabbricante che intende commercializzarli per essere posti in esercizio così come li ha assemblati. In questa tipologia di impianti rientrano anche gli Impianti Frigo.

La direttiva PED è entrata in vigore obbligatoriamente dal 30/5/2002: da questa data gli impianti rientranti nel ciclo del freddo sono interessati, sia a livello di componenti che d'impianto, all'applicazione della direttiva PED. Conseguentemente, gli installatori devono adeguarsi alle nuove disposizioni normative. Sono soggetti alla direttiva tutti i componenti di un impianto, cioè:

- **i classici recipienti a pressione** (condensatori, evaporatori,,ecc.);
- **la maggior parte degli accessori** (indicatori di passaggio,filtri,separatori di liquido,valvole di ritegno, tubazioni e raccordi,rubinetti a sfera,a globo, valvole di sicurezza,tappi fusibili, pressostati, termostati, regolatori di livello, dispositivi di misura e controllo,ecc.);
- **il sistema di tubazioni di collegamento** tra le varie attrezzature componenti l'impianto;
- **alcuni tipi di compressori** (generalmente ermetici e semiermetici ricadenti in una Cat.> I).

Si riporta una foto che raffigura un gruppo frigo ad uso industriale.

GRUPPI FRIGO AD USO INDUSTRIALE
(recipiente, valvola di sicurezza, tubazioni)



Avere tutti i componenti dell'impianto marcati CE non è però sufficiente. É necessario che tutto l'impianto (Insieme) sia marcato CE, cioè, l'intero impianto frigo deve soddisfare i RES (Requisiti Essenziali di Sicurezza) previsti dall'Allegato I della Direttiva PED. Con le nuove disposizioni chi progetta, costruisce e commercializza un impianto frigo, **denominato Fabbricante dell'Insieme**, deve, oltre a progettare e costruire l'impianto, anche incaricare un Organismo Notificato (per insiemi di categoria di rischio PED > 1) che effettuerà la valutazione di conformità dell'impianto alle disposizioni della direttiva, per consentire l'apposizione della marcatura CE e l'emissione da parte del Fabbricante della dichiarazione di conformità CE-PED e del Manuale d'uso e manutenzione.

L'apposizione abusiva del marchio CE – PED sono reati sanzionati dall'art. 18 del D.Lgs. 93/2000.

In estrema sintesi l'iter tecnico-procedurale (IN STEP) da seguire dal momento della programmazione di una attrezzatura o un insieme a pressione al momento dell'immissione sul mercato risulta essere:

STEP 1): verificare che la pressione PS > 0,5 bar (art. 1 comma 1 D.Lgs. 93/2000) ;

STEP 2): verificare che l'attrezzatura non sia tra quelle escluse (art. 1 comma 3 D.Lgs.93/2000);

STEP 3): classificazione dell'attrezzatura a pressione in categorie (I, II, III, IV), secondo criteri di rischio crescente. Ai fini della classificazione è importante considerare i fluidi . Essi sono suddivisi in due gruppi:

- gruppo 1: fluidi pericolosi (esplosivi, estremamente infiammabili, facilmente infiammabili, infiammabili, altamente tossici, tossici e comburenti;
- gruppo 2: fluidi non pericolosi, non rientranti fra quelli del gruppo 1.

Questo è previsto dall'art.9 del D.Lgs. 93/2000.



Si riporta sotto una tabella in cui si evidenziano le caratteristiche essenziali di alcuni fluidi frigoriferi

	Tipo		Formula chimica	Pressione di saturazione [bar]		Volume specifico [m^3/kg]	Calore latente di vaporiz. [kJ/kg]	Produz. frig. volumetrica [kJ/m^3]
				−10 °C	25 °C	−10 °C	1 bar	−10 °C÷25 °C
NATURALI	Vapore d'acqua (R718)		H_2O		0.0317		2257	
NATURALI	Ammoniaca (R717)		NH_3	2.899	10.00	0.419	1369	2700
NATURALI	Anidride carbonica (R774)		CO_2					
NATURALI	Propano (R290)		C_3H_8					
NATURALI	Idrocarburi in genere		–					
SINTETICI	CFC (cloro-fluoro-carburi)	R11	$CFC\ell_3$	0.257	1.064	0.612	182	267
SINTETICI		R12	$CF_2C\ell_2$	2.193	6.517	0.077	162	1608
SINTETICI		R13	$CF_3C\ell$	15.202	35.5	0.010	150	
SINTETICI	HCFC (idro-cloro-fluoro-carburi)	R22	$CHF_2C\ell$	3.545	10.438	0.065	234	2623
SINTETICI		R123	$CHC\ell_3CF_3$	0.204	0.913	0.690	170	215
SINTETICI	HFC (idro-fluoro-carburi)	R407C	mixture					
SINTETICI		R134a	$C_2H_2F_4$	2.005	6.655	0.100	217	1589

STEP 4): Progettare, costruire e collaudare in conformità ai RES " Requisiti Essenziali di Sicurezza", Allegato I del D.Lgs. 93/2000.

STEP 5): Effettuare o far effettuare la valutazione di conformità, prima dell'immissione sul mercato, ai fini della marcatura CE (art. 10 D.Lgs. 93/2000) . La procedura di conformità cui sottoporre l'attrezzatura o insieme, è a scelta del fabbricante tra quelle previste per la categoria in cui è classificata l'attrezzatura o l'insieme . Le procedure di valutazione di conformità da applicare alle diverse categorie sono riportate nella seguente tabella.

In funzione della categoria la direttiva prevede diverse, ed alternative procedure di valutazione della conformità, prevista dall'allegato III del D.Lgs. 93/2000.

Si riporta sotto una tabella di sintesi.

Categoria di rischio	Modulo da utilizzare
Art. 3 par. 3	Le attrezzature a pressione aventi caratteristiche inferiori o uguali al limiti fissati ai punti 1.1, 1.2 e 1.3 della direttiva devono essere fabbricate secondo una corretta prassi costruttiva e devono essere corredate da sufficienti istruzioni per l'uso e recare marcature che consentano di identificare il Fabbricante o il suo Mandatario Tali attrezzature NON devono recare la marcatura CE
I	A – Controllo di fabbricazione interno
II	A1 – Controllo di fabbricazione interno e sorveglianza della verifica finale D1 – Garanzia qualità di produzione E1 – Garanzia qualità prodotto
III	B1 + D – Esame CE della progettazione + Garanzia qualità produzione B1 + F – Esame CE della progettazione + Verifica su prodotto B + E – Esame CE del tipo + Garanzia qualità prodotto B + C1 – Esame CE del tipo + Conformità al tipo H – Garanzia qualità totale
IV	B + D – esame CE del tipo + Garanzia qualità produzione B + F – Esame CE del tipo + Verifica su prodotto G – Verifica CE di un unico prodotto H1 – Garanzia qualità totale con controllo della progettazione e particolare sorveglianza della verifica finale

Gli insiemi (impianti frigo) devono essere sottoposti ad una **procedura globale di conformità** che comprende :

a) **valutazione di conformità di conformità di ciascuna delle attrezzature a pressione costituite dell'insieme** . La procedura di valutazione di conformità è determinata in base alla categoria di rischio di ciascuna delle attrezzature , (Art. 10 comma 6 lett. a) del D.Lgs. 93/2000);

b) **la valutazione dell'integrazione dei diversi componenti l'insieme**, (punti 2.3, 2.8, 2.9 dell'allegato I D.Lgs. 93/2000) che viene determinata in funzione della categoria di rischio più elevata delle attrezzature interessate, senza tener conto degli accessori di sicurezza, (Art. 10 comma 6 lett. b) del D.Lgs. 93/2000);

c) **la valutazione della protezione dell'insieme**, per evitare che vengano superati i limiti di esercizio in base ai punti 2.10 e 3.2.3 dell'allegato I D.Lgs. 93/2000, che deve essere effettuata in funzione della più elevata categoria delle attrezzature di proteggere , (Art. 10 comma 6 lett. c) del D.Lgs. 93/2000) .

STEP 6): apporre la marcatura CE in conformità all'art.15 e allegato VI del D.Lgs.93/2000 , in modo visibile, facilmente leggibile e indelebile sull'insieme (Impianto frigorifero) ;

STEP 7): redigere la dichiarazione CE di conformità dell'insieme in conformità all'allegato VII del D.Lgs. 93/2000, indicando tra le altre cose :
- Nome e indirizzo del fabbricante,
- Descrizione dell'insieme ,
- Procedura di valutazione di conformità utilizzata;
- Nome dell'Organismo Notificato che ha effettuato il controllo,
- Altre norme o specifiche tecniche eventualmente utilizzate ,
- Riferimento ad altre direttive comunitarie che sono state eventualmente applicate .
- il gruppo del fluido frigorigeno (per esempio i fluidi R134A, R507, R404A, R410A, R22 rientrano nel gruppo 2 – non pericolosi) ,
- la pressione massima ammissibile PS,
- Temperatura massima e minima ,

STEP 8): Istruzioni operative (manuale d'uso) destinato all'utilizzatore contenenti tutte le informazioni utili ai fini della sicurezza comprese la messa in servizio, l'impiego, la manutenzione e i controlli che devono essere effettuati da parte delle stesso , in conformità al punto 3.4) Allegato I del D.Lgs. 93/2000 . In estrema sintesi tale elaborato deve contenere:
- Descrizione dell'insieme (impianto frigorifero o di condizionamento) ,
- Descrizione dei componenti ,
- Disegni e schemi ,
- istruzioni per la messa in servizio (avviamento, arresto , ecc.),
- istruzioni per il trasporto e la movimentazione,
- descrizione delle più comuni anomalie dell'impianto,
- istruzioni per il corretto recupero del fluido frigorigeno (se pericoloso),
- altre informazioni di sicurezza .

4. APPLICAZIONE DEL DM 329/04

Questa normativa regola l'esercizio delle attrezzature e/o insiemi a pressione anche in luoghi non di lavoro.

La messa in funzione di un impianto frigo , che rientri in una delle quattro categorie di rischio di cui al D.Lgs. 93/2000 (PED) viste sopra, implica precisi adempimenti da parte dell'utilizzatore, che ricadono in parte sul frigorista stesso che è chiamato a produrre precisa documentazione .

In merito l'art. 6 del DM 329/04 prescrive che l'utilizzatore all'atto della messa in servizio, invia all'ISPESL e all'ASL una **dichiarazione di messa in servizio** , contenente :

a) **elenco delle singole attrezzature**, con i rispettivi valori di pressione, capacità e fluido di esercizio;

b) **una relazione tecnica**, **con lo schema di impianto**, recante le condizioni di installazione

e di esercizio, le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate ,

c) **una espressa dichiarazione redatta ai sensi del DPR 445/2000**, attestante che l'installazione è stata eseguita in conformità a quanto indicato nel manuale d'uso visto nel paragrafo precedente

d) **verbale di verifica di cui all'art.4 del DM 329/04** " Verifica obbligatoria di primo impianto ovvero della messa in servizio " La verifica viene eseguita dall'ISPESL competente per territorio ed ha come obiettivo la corretta installazione .

Nel caso in cui l'insieme (impianto frigo) ai sensi dell'art.5 comma 1 lettera d) è già **in possesso della verifica degli accessori di sicurezza e di controllo da parte dell' Organismo Notificato competente**, non occorre procedere alla verifica di cui all'art. 4 del DM 329/04, fermo restando l'effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'art. 8 dello stesso DM 329/04 con le frequenze riportate nell'allegato A e B del DM 329/04 .

Per detti insiemi esclusi dal controllo della messa in servizio di cui all'art. 5 del DM 329/05 visti prima, la dichiarazione di messa in servizio di cui sopra, consente l'attivazione dell'attrezzatura o insieme in pressione a condizione che **l'utilizzatore attesti** che le predette attrezzature o insiemi siano debitamente installati, mantenuti in efficienza e utilizzati conformemente alla loro destinazione e non pregiudicano la salute e la sicurezza delle persone o degli animali domestici o la sicurezza dei beni .

Inoltre anche per gli impianti frigo ESISTENTI, l'utilizzatore deve denunciare all'ISPESL (art. 16 DM 329/04) i recipienti per liquidi e le tubazioni mai assoggettati ad omologazione o controlli di legge, per i quali le caratteristiche tecniche rientrano tra quelle che individuano le condizioni di obbligatorietà alla riqualificazione periodica . Si evidenzia che ai sensi dell'art. 2 del DM 329/04 sono escluse dalla denuncia di messa in servizio tutte le tubazioni con DN minore o uguale a 80 con qualunque tipo di fluido pericoloso o non pericoloso.

5. APPLICAZIONE DEL D.Lgs. 81/08 MOD. DAL LGS. 106/09

Se il luogo di installazione di un impianto frigo (insieme a pressione) è un luoghi di lavoro ai sensi del D.Lgs. 81/2008 mod. ed int. dal D.Lgs 106/09, esso deve essere considerato una attrezzatura di lavoro a tutti gli effetti (vedi art. 69 del D.Lgs. 81/08 e smi) . In conseguenza anche gli impianti in questione, devono seguire il Capo I del Titolo III del Testo Unico di Sicurezza e Salute prima evidenziato .

In particolare **l'Utilizzatore/ Datore di Lavoro**, secondo le indicazioni fornite dal fabbricante nel manuale d'uso e manutenzione , deve sottoporre l'attrezzatura e/o insieme ad un intervento di **controllo iniziale** (dopo l'installazione e prima della messa in esercizio) oltre ad interventi di **controlli periodici** secondo le frequenze stabilite in base alle indicazioni fornite dai fabbricanti.

I controlli di cui sopra, sono volti ad assicurare il buono stato di conservazione e di efficienza ai fini della sicurezza degli impianti frigo, visti come attrezzature di lavoro; gli stessi controlli devono essere effettuati da persona competente . I risultati di tali controlli devono essere riportati per iscritto e almeno quelli relativi agli ultimi tre anni, devono essere conservati e tenute a disposizione degli organi di vigilanza .

Inoltre, poiché gli impianti frigo (insiemi in pressione) rientrano nell'allegato VII del D.Lgs. 81/08 e smi, oltre ai **controlli** tramite persona competente evidenziati precedentemente, il datore di lavoro deve sottoporre i suddetti impianti a **verifiche periodiche** volte a valutarne l'effettivo stato di conservazione e di efficienza ai fini della sicurezza con frequenza indicata nel medesimo allegato . La parte dell'allegato VII del D.Lgs. 81/08 e smi, che interessano le attrezzature a pressione, coincide con l'allegato A e B del DM 329/04 , in cui vengono espressamente indicati i tipi di attrezzature o insiemi a pressione (con la categoria di rischio I,II,III,IV), il tipo di fluido 1 o 2 (pericoloso o non pericoloso) e la periodicità e il tipo di verifica .

La prima di tali verifiche è effettuata dall'ISPESL in conformità all'art. 71 comma 11 del D.Lgs. 81/08 e smi . Le successive verifiche sono effettuate dall'ISPESL, dalle ASL, che vi provvedono nel termine di 30 giorni dalla richiesta, decorso tale tempo il datore di lavoro può avvalersi di soggetti pubblici o privati abilitati con le modalità del comma 13 dell'art. 71 del D.Lgs. 81/08 e smi.

Si riporta di seguito lo stralcio dell'allegato VII del D.Lgs. 81/2008 e smi, con riferimento alle attrezzature o insiemi a pressione.

Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 1 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Recipienti/insiemi classificati in III e IV categoria, recipienti contenenti gas instabili appartenenti alla categoria dalla I alla IV, forni per le industrie chimiche e affini, generatori e recipienti per liquidi surriscaldati diversi dall'acqua.	Verifica di funzionamento: biennale Verifica di integrità: decennale
Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 1 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Recipienti/insiemi classificati in I e II categoria.	Verifica di funzionamento: quadriennale Verifica di integrità: decennale
Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 1 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Tubazioni per gas, vapori e liquidi surriscaldati classificati nella I, II e III categoria	Verifica di funzionamento: quinquennale Verifica di integrità: decennale
Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 1 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Tubazioni per liquidi classificati nella I, II e III categoria	Verifica di funzionamento: quinquennale Verifica di integrità: decennale
Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 1 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Recipienti per liquidi appartenenti alla I, II e III categoria.	Verifica di funzionamento: quinquennale Verifica di integrità: decennale
Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 2 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Recipienti/insiemi contenenti gas compressi, liquefatti e disciolti o vapori diversi dal vapor d'acqua classificati in III e IV categoria e recipienti di vapore d'acqua e d'acqua surriscaldata appartenenti alle categorie dalla I alla IV	Verifica di funzionamento: triennale Verifica di integrità: decennale
Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 2 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Recipienti/insiemi contenenti gas compressi, liquefatti e disciolti o vapori diversi dal vapor d'acqua classificati in I e II categoria	Verifica di funzionamento: quadriennale Verifica di integrità: decennale
Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 2 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Generatori di vapor d'acqua.	Verifica di funzionamento: biennale Visita interna: biennale Verifica di integrità: decennale
Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 2 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Tubazioni gas, vapori e liquidi surriscaldati classificati nella III categoria, aventi TS $\leq$ 350 °C	Verifica di integrità: decennale
Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 2 (D.lgs. 93/2000 art. 3) Tubazioni gas, vapori e liquidi surriscaldati classificati nella III categoria, aventi TS $>$ 350 °C	Verifica di funzionamento: quinquennale Verifica di integrità: decennale

6. CONCLUSIONI

Alla luce di un modo di procedere da parte degli installatori/frigoristi non sempre rispettoso delle leggi vigenti, con tale memoria gli autori vogliono fornire in modo essenziale ma puntuale le procedure da seguire per una corretta progettazione, costruzione, immissione sul mercato e utilizzazione degli impianti frigoriferi e di condizionamento visti come insiemi a pressione sia nei luoghi di vita che di lavoro .

7. BIBLIOGRAFIA

[1] S.O. GURI n° 91 del 18 aprile 2000- Serie Generale: " D.Lgs. 25 febbraio 2000 n° 93 – Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressioni ",

[2] S.O. GURI n° 22 del 28 gennaio 2005 - Serie Generale: " Decreto 1 dicembre 2004, n° 329 – Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi di cui all'art.19 del D.Lgs. 93/2000".

3
Attrezzature o insiemi a pressione (Autoclavi) funzionanti a temperatura maggiore di 100°C. La sicurezza nei cicli di funzionamento in continuo applicati agli apparecchi di tintura dei filati in corda e della cottura di alimenti in scatola

A. De Musso - M.F.S. De Musso**
*G. Argento***

** Dipartimento ISPESL di Bari*
*** Dipartimento ISPESL di Pescara*

1. SOMMARIO

Com'è noto la normativa delle attrezzature o insiemi a pressione ha subito molti cambiamenti dovuti all'obbligo della valutazione dei rischi e della sicurezza negli ambienti di vita e di lavoro prevista della Direttiva europea PED 97/23/CE - recepita in Italia con il D.Lgs.vo 25/2/2000 n. 93. Pertanto le attrezzature ed insiemi sottoposti a pressione di liquidi, gas e vapori devono essere progettati e costruiti in conformità ai requisiti di resistenza ed idoneità all'uso stabiliti dalle norme di legge vigenti in materia, valutandone i rischi relativi alla pressione ed alla temperatura del fluido. Tale valutazione deve essere eseguita dall'Utilizzatore dell'impianto che risulta essere il solo responsabile della sua messa in servizio e dell'utilizzo.

Le attrezzature o insiemi a pressione funzionanti a vapore o ad acqua surriscaldata a temperatura maggiore di 100°C, chiamate **autoclavi**, sono usate in molti settori tra cui la cottura di alimenti in barattoli, vaschette e contenitori e per la tintura di filati.

Le autoclavi negli anni 1960/70 non disponevano di dispositivi di sicurezza atti ad impedire l'apertura, in assenza di pressione, dei coperchi e provocarono una serie di infortuni, anche mortali, per la tracimazione di liquido a temperatura ustionante dai recipienti, all'atto dell'apertura dei rispettivi coperchi. L'A.N.C.C. emanò proprie circolari tecniche, affinché le autoclavi venissero dotate dei dispositivi atti ad impedire l'apertura delle portelle in presenza di pressione interna alla camera e obbligò le ditte costruttrici ad omologare tali dispositivi di sicurezza.

Le autoclavi possono essere orizzontali o verticali, cilindriche o rettangolari, ad una o due portelle di carico, piccole sterilizzatrici di laboratorio, grandi macchine di cottura alimenti in scatola o per tintura di tessuti.

Il principio di funzionamento di queste attrezzature a pressione, pur nella diversità dello scopo da raggiungere, sono accomunati dagli stessi principi di funzionamento e dalle stesse problematiche di sicurezza in quanto elaborano vapore o liquido a temperatura ustionante, temperatura maggiore di 60°C., con apertura saltuaria o frequente dei coperchi durante la lavorazione.

Sia le attrezzature a pressione (autoclavi) utilizzate per la tintura di tessuti che quelle di cottura degli alimenti all'interno di contenitori sono progettate in accordo alla Direttiva PED ed il loro funzionamento si basa su programmi di lavorazione (chiamate ricette di lavoro) che riscaldano o raffreddano il prodotto tramite uno scambiatore di calore ed una pompa di circolazione. Tutto il ciclo è comandato da PLC tramite valvole ad azionamento pneumatico e valvole di intercettazione ad intervento manuale. Se queste autoclavi funzionano in parallelo con altre

necessitano di soluzioni integrate completamente automatizzate per gestire sia il processo produttivo che la protezione globale della sicurezza riferita alle sicurezze funzionali dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili inseriti nel contesto impiantistico generale.

La programmazione errata dei cicli di gestione delle sequenze di processo può provocare incidenti piuttosto gravi ed è per questo che le attrezzature a pressione sono dotate di dispositivi di sicurezza omologati che impediscono:

- l'apertura dei coperchi fino a che il liquido contenuto non sia disceso sotto il "livello di sicurezza";
- l'immissione del liquido a temperatura ustionante all'interno del recipiente prima che questo sia correttamente chiuso;
- l'azionamento della pompa di circolazione del liquido a temperatura ustionante prima che il recipiente sia correttamente chiuso;
- l'apertura dei coperchi prima dell'arresto della pompa di circolazione del liquido;
- l'apertura spontanea dei coperchi e portelle prima dell'arresto della pompa di circolazione del liquido;
- l'apertura spontanea dei coperchi o portelle durante la fase di esercizio non a pressione del recipiente, allorché all'interno permangono liquidi a temperatura ustionante ad un livello superiore a quello di sicurezza;
- l'inizio della fase di apertura prima che all'interno del recipiente si sia stabilita la pressione atmosferica.

Nelle norme d'uso è specificatamente raccomandato che questo tipo di attrezzatura a pressione sia condotto da personale qualificato, formato e competente, con conoscenza teorica del processo e un addestramento pratico all'utilizzo delle apparecchiature.

2. PREMESSA

Com'è noto la normativa delle attrezzature o insiemi a pressione negli ultimi anni ha subito molti cambiamenti dovuti alla necessità, imposta per legge, di effettuare la valutare dei rischi e la sicurezza negli ambienti di vita e di lavoro soprattutto dopo l'entrata in vigore della Direttiva europea 97/23/CE - recepita in Italia col D.Lgs.vo 25/2/2000 n. 93 - relativa alla costruzione e commercializzazione in sicurezza delle attrezzature a pressione nel Mercato europeo, nota meglio come Direttiva PED (= Pressure Equipment Directive) e del D.lgs. 09/04/2008 n. 81 e s.m.i.

Pertanto le attrezzature, insiemi ed impianti sottoposti a pressione di liquidi, gas, vapori, e loro miscele, devono essere progettati e costruiti in conformità ai requisiti di resistenza ed idoneità all'uso stabiliti dalle norme di legge vigenti in materia, valutando in particolare i rischi dovuti:

- alla pressione ed alla temperatura del fluido, nei riguardi della resistenza del materiale dell'attrezzatura o insieme;
- a pericoli di natura meccanica
- all'utilizzo dell'attrezzatura o insieme da parte del personale
- all'ambiente circostante agli stessi.

Lo studio della sicurezza di un impianto a pressione richiede una valutazione dei rischi che partendo dalle fasi di progettazione, fabbricazione e collaudo, perviene alle fasi di installazione, esercizio e manutenzione.

La valutazione di tutti i rischi viene attribuita, dalla nuova normativa, al datore di lavoro che, normalmente è l'Utilizzatore o il Committente dell'impianto, il solo responsabile della sua messa in servizio e del suo utilizzo, il quale deve anche valutare l'eliminazione dei rischi e, ove ciò non sia possibile, la loro riduzione al minimo in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico (art. 15 D.lgs. 81/08). Il datore di lavoro ha anche la responsabilità di predisporre le misure generali di tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori nei luoghi di lavoro (art. 15 D.lgs. 81/08) dove sono installate le attrezzature o insiemi sottoposti a pressione di liquidi, gas e vapori.

3. ATTREZZATURE O INSIEMI A PRESSIONE (AUTOCLAVI) FUNZIONANTI A TEMPERATURA MAGGIORE DI 100°C

Le attrezzature o insiemi a pressione funzionanti a vapore o ad acqua surriscaldata a temperatura maggiore di 100°C, chiamate **autoclavi**, sono di vario tipo ed adoperate in molti settori quali la sterilizzazione dei prodotti medicali, gli apparecchi di cottura e pastorizzazione di alimenti in scatola siano essi barattoli, vasi, buste, vassoi, vaschette e contenitori, gli apparecchi per tintura di filati, ecc.

Dette attrezzature a pressione adoperano il vapore o acqua surriscaldata per trasportare il calore ad alta temperatura necessario alla elaborazione di un qualsiasi processo fisico sia esso utilizzato per la sterilizzazione dei prodotti medicali che per la cottura di cibi o per la tintura di filati.

Com'è noto, la pressione del vapore e la temperatura sono direttamente proporzionali tra loro: ad una maggiore pressione corrisponde una più elevata temperatura. La pressione utilizzata per le autoclavi và da 0,4 bar a 2,5 bar che permette di raggiungere temperature da 110°C a 140ºC a seconda del ciclo utilizzato.

Le attuali autoclavi, pur essendo sempre molto pericolose, hanno raggiunto un grado di sicurezza sufficientemente elevato. Negli anni 1960/70, quando tali apparecchi non erano dotati di dispositivi di sicurezza atti ad impedire l'apertura, in assenza di pressione, dei coperchi o portelle hanno provocato una serie di infortuni, anche mortali, per la tracimazione dai recipienti stessi di liquido a temperatura ustionante, all'atto dell'apertura dei rispettivi coperchi o portelle.

Ciò portò l'A.N.C.C. (Associazione Nazionale Controllo della Combustione) ad emanare proprie circolari tecniche, n. 3498 del 07/02/1966 e n. 8968 del 23/2/80 e n. 34457 del 25/9/1980, affinché questi apparecchi venissero dotati dei dispositivi atti ad impedire l'apertura delle portelle in presenza di pressione interna alla camera e obbligò le ditte costruttrici ad omologare tali dispositivi di sicurezza.

Le autoclavi possono essere del tipo orizzontale o verticale, cilindriche o rettangolari, ad una o due portelle di carico a seconda della loro dimensione ed il loro utilizzo. Infatti la loro gamma varia dalle piccole sterilizzatrici dei laboratori di analisi alle grandi sterilizzatrici delle sale operatorie degli ospedali, alle grandi macchine di cottura alimenti in scatola o per tintura di tessuti o filati.

Di seguito sono raffigurate alcune di tali attrezzature a pressione (autoclavi)

Autoclavi per tintura filati



Fig. 1 - Insieme per tintura tessuti



Fig. 2 - Autoclave per tinture

Autoclavi per cottura alimenti in scatola



Fig. 3 - Autoclave per cottura



Fig. 4 - Autoclave per cottura

Il principio di funzionamento di queste attrezzature a pressione, pur nella diversità dello scopo da raggiungere, sono accomunati dagli stessi principi di funzionamento e dalle stesse problematiche di sicurezza.

Infatti all'interno di tali attrezzature a pressione avvengono elaborazioni con vapore o liquido a temperatura ustionante, cioè con temperatura maggiore di 50°C, che per la specificità del loro ciclo produttivo si rende necessario l'apertura saltuaria o frequente dei coperchi o delle portelle durante la lavorazione pur permanendo liquido ustionante all'interno dell'attrezzatura in assenza di pressione.

Per evitare pericoli di infortuni tali attrezzature vengono dotate di dispositivi di sicurezza che impediscono:

- l'apertura dei coperchi o portelle fino a che il liquido contenuto non sia disceso sotto il "livello di sicurezza";
- l'immissione del liquido a temperatura ustionante all'interno del recipiente prima che questo sia correttamente chiuso;
- l'azionamento della pompa di circolazione del liquido a temperatura ustionante prima che il recipiente sia correttamente chiuso;
- l'apertura dei coperchi o portelle prima dell'arresto della pompa di circolazione del liquido;
- l'apertura spontanea dei coperchi e portelle prima dell'arresto della pompa di circolazione del liquido;
- l'apertura spontanea dei coperchi o portelle durante la fase di esercizio non a pressione del recipiente, allorché all'interno permangono liquidi a temperatura ustionante ad un livello superiore a quello di sicurezza;
- l'inizio della fase di apertura prima che all'interno del recipiente si sia stabilita la pressione atmosferica.

4. ATTREZZATURE A PRESSIONE PER TINTURA IN PEZZA

4.1 Macchina overflow a pressione per tintura di pezze

Le principali macchine per la tintura di tessuti in pezza sono del tipo:

1. **Jet** in cui il tessuto è mosso dal movimento del bagno che fluisce ad elevata velocità attraverso la strozzatura dell'ugello;
2. **Overflow** in cui il tessuto è trasportato da un dispositivo a "cascata d'acqua" detto flow;
3. **Jet overflow** in cui il tessuto è trasportato con 3 diversi sistemi: ad acqua, ad aria e ad acqua/aria.

Prima di descrivere i dispositivi di sicurezza adottati, illustreremo il funzionamento di una macchina per tintura in pezza del tipo **overflow**. Trattasi di un particolare tipo di attrezzatura a pressione per tintura di tessuti in corda. Per questo tipo di attrezzatura a pressione è previsto il funzionamento a coperchio aperto o chiuso in presenza di liquido a livello prestabilito automaticamente.

La tintura in overflow sotto pressione e utilizzata per tingere in corda tessuti delicati o tessuti a maglia di ogni tipo di fibra. Di solito la pressione di esercizio è di 0,4 bar con una temperatura del bagno di 108 °C.

Negli overflow non si ha iniezione diretta di bagno contro il tessuto, viene trasportato per caduta spontanea insieme alla corrente del bagno.

4.2 Descrizione della macchina

La macchina overflow [4] puo essere composta da 1 a 6 canali corrispondenti al numero di corde che possono essere tinte. La corda, formata da una a più pezze cucite testa-coda, viene trascinata da un aspo interno alla macchina e aspirata da un imbuto o ugello di trascinamento per arrivare alla vasca di rilassamento.

Qui il tessuto è immerso nel bagno di tintura e continua a circolare all'interno della macchina, fino a riemergere nella parte anteriore della stessa, per riprendere il ciclo.

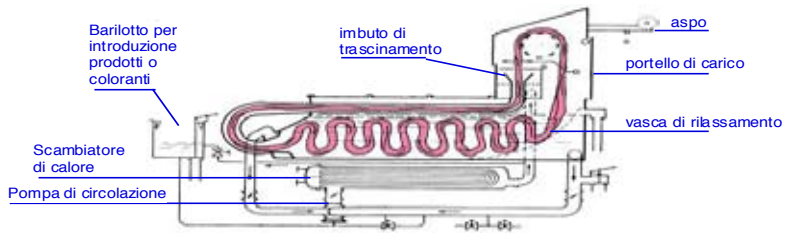


Fig. 5 - Autoclave per tintura in pezza

La velocità del tessuto può variare dai 50 ai 200 m/min secondo il tipo e la quantità delle pezze in lavorazione e tale velocità è regolabile aumentando o diminuendo il moto dell'aspo.

La macchina overflow e composta:

- dall'aspo
- dall'imbuto di trascinamento
- dalla vasca di rilassamento
- dalla pompa di circolazione del bagno all'interno della macchina;
- dallo scambiatore di calore per riscaldare o raffreddare il bagno;
- dal barilotto esterno per l'introduzione dei prodotti ausiliari e coloranti all'interno del bagno.

La procedura di caricamento e scarico di queste macchine può essere manuale o automatizzata.



Fig. 6 - Autoclave tintura THEN SINERGY 2[3]

4.3 Descrizione del processo di tintura dei tessuti

Per la tintura di tessuti si introduce l'acqua nel recipiente (fig. n.8) tramite una valvola pneumatica (1) la quale si chiuderà automaticamente al livello stabilito tramite il dispositivo di controllo (3).

Il livello massimo di lavoro è quello indicato sul disegno e non potrà mai essere superato in qualsiasi fase di lavorazione. Dopo l'introduzione dell'acqua, è avviata la pompa di circolazione (4) che per il suo particolare percorso non potrà mai causare alcuna fuoriuscita di bagno dal boccaporto.

Detta pompa ha il compito di introdurre il tessuto nella macchina ed in seguito, dopo la cucitura ad anello del tessuto, di trascinarlo per il normale processo di tintura. Il coperchio rimane aperto per il carico del tessuto e fino al riscaldamento del bagno alla temperatura di 50° C. Dopo tale temperatura il coperchio viene chiuso per poter procedere alla pressurizzazione mediante aria (6) qualora lo richiedesse il tipo di lavorazione. La pressione è regolata tramite il manometro regolatore (10).

La chiusura del coperchio è a manovra unica e manuale ed è assicurata da 2 semianelli a "C" che agganciano l'anello del coperchio e del corpo inferiore. La leva di chiusura è ad oltrepassamento del punto morto, il che esclude la possibilità di imperfetta chiusura dell'anello stesso.

Gli accessori di controllo, protezione e di sicurezza installati sulla macchina sono:

- manometro, Certificato CE, con funzione di pressostato di blocco a riarmo manuale (7) e con rubinetto e flangia di controllo.
- termometro, Certificato CE, con funzione di termostato di blocco a riarmo manuale (5), il primo contatto è impostato sulla temperatura di sicurezza apertura coperchio, mentre il secondo contatto è impostato sulla temperatura massima di esercizio. In questo modo è possibile tenere aperto il coperchio permettendo di funzionare sia alla pompa di circolazione che al riscaldamento fino a quando non viene superata la temperatura di sicurezza apertura portello. A questo punto se il coperchio non sarà chiuso, non potranno funzionare la pompa, il riscaldamento e la pressurizzazione.
- Pozzetto di controllo temperatura (8)
- Pressostato di blocco (7) (normalmente in posizione di chiusura) che interrompe il circuito elettrico al raggiungimento della prefissata pressione massima di esercizio.
- Valvola di sicurezza (9) rispondente alle disposizioni, posta sul corpo o sulla tubazione nelle immediate vicinanze.
- Valvola di sfiato (11) con funzione anche di riempivuoto e spia.
- Valvola riempivuoto (12)

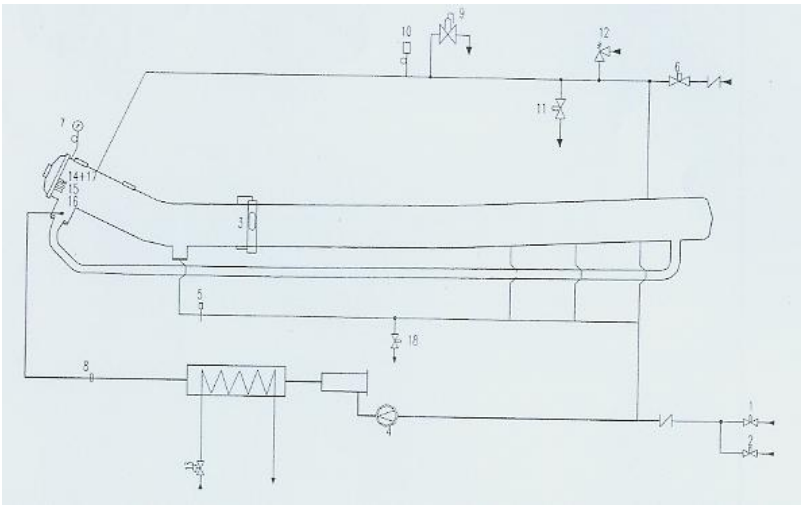


Fig. 7 - Schema funzionamento autoclave

Il pressostato di blocco (7) e l'interruttore termico automatico (5) vengono montati in serie, sulla fase, col pressostato generale ed agiscono pertanto sulle valvole di intercettazione del fluido primario (13).

Per quanto riguarda i sistemi di sicurezza adottati contro la tracimazione di liquido ustionante dal coperchio nella fase non a pressione dell'autoclave o contro l'apertura e chiusura dei portelli in presenza di pressione all'interno dell'attrezzatura a pressione essi sono costituiti da:

- leva di comando dell'anello a "C." manuale;
- pistoncino con asta di bloccaggio (automatico) direttamente in comunicazione con l'autoclave (14) che interferisce con la leva di comando dell'anello a "C" impedendone l'apertura a stelo steso;
- rubinetto di spia (15)con leva che a valvola chiusa interferisce con la leva di comando dell'anello a C;
- pressostato generale (Automatico) in posizione di apertura in caso di interruzione dell'aria.
- valvola pneumatica (16) di coperchio chiuso, in posizione di chiusura in caso di apertura del coperchio.
- elettrovalvola di consenso apertura valvola .
- valvola di scarico (18) manuale od automatica.

La presenza dei succitati dispositivi fa in modo che:

A) L'apertura del coperchio sia possibile soltanto quando nell'apparecchio ci sia pressione "nulla"; la posizione del pistoncino (14) garantisce il bloccaggio della leva di chiusura del boccaporto. Ad ogni modo prima di aprire il boccaporto si dovrà aprire la valvola di sfiato (15) o rubinetto spia la cui maniglia interferisce sulla leva di chiusura del boccaporto. Detta valvola permette l'accertamento dell'assenza di pressione all'interno dell'apparecchio.

B) L'apertura della valvola di pressurizzazione (15) è possibile solo quando il coperchio è perfettamente chiuso.

Esiste, inoltre, un livello minimo di sicurezza del liquido, fissato a quota "X", per cui risulta impossibile l'apertura spontanea del coperchio.

Nelle norme d'uso viene specificatamente raccomandato che questo tipo di attrezzatura a pressione sia condotto da personale qualificato, formato e competente. La competenza presuppone una conoscenza teorica del processo, un addestramento pratico all'utilizzo delle apparecchiature, una conoscenza delle caratteristiche fisiche e tecniche dei prodotti da trattare.

Solo il personale qualificato possiede le necessarie conoscenze tecniche per interpretare correttamente ed applicare concretamente le normative di sicurezza e gli avvertimenti contenuti nelle documentazioni specifiche. La conoscenza e la corretta applicazione della normativa di sicurezza e degli avvertimenti sono presupposti per un'installazione e messa in funzione esente da pericoli.

5. ATTREZZATURE A PRESSIONE PER BAGNO DI COTTURA ALIMENTI

Come le attrezzature a pressione (autoclavi) utilizzate per la tintura di tessuti anche quelle di sterilizzazione degli alimenti all'interno di ogni tipo di contenitore siano essi barattoli, vasi, buste in materiali compositi e contenitori di plastica, vassoi e vaschette e contenitori in cartone sono progettate in accordo alla Direttiva PED e costruite per poter funzionare per cicli di produzione in continuo (produzione di 24 ore) ed idonee ad operare in assoluta sicurezza con i cicli produttivi aventi determinate condizioni di esercizio indicate nel manuale di uso e manutenzione.

5.1 Descrizione della macchina

L'autoclave è costituita:

- dal serbatoio del tipo cilindrico orizzontale o verticale fondi bombati, con relativa portella di carico e scarico dei prodotti da lavorare;
- dalla pompa di circolazione del bagno all'interno della serbatoio;
- dallo scambiatore di calore per riscaldare o raffreddare il bagno;
- dagli accessori di controllo, protezione e sicurezza.

Il funzionamento dell'autoclave si basa su programmi di cottura (chiamate ricette di lavoro) che riscaldano o raffreddano il prodotto tramite uno scambiatore di calore ed una pompa di

circolazione. Tutto il ciclo viene comandato da valvole ad azionamento pneumatico e valvole di intercettazione ad intervento manuale.

Queste attrezzature a pressione, per quanto riguarda gli accessori di controllo, protezione e sicurezza, sono già dotate degli accessori previsti dalla Direttiva 97/23/CE e dal D.M. 1/12/2004 n. 329. Inoltre, per poter svolgere automaticamente il ciclo di produzione utilizzano sistemi elettromeccanici ed in particolare sistemi basati anche su tecnologie digitali (PLC).

Sono molto utilizzati i sistemi di sterilizzazione ad autoclavi multiple, montate in serie, fornite di soluzioni integrate completamente automatizzate per impianti particolari. Tali impianti utilizzano le soluzioni ad anello o a navetta per rendere completamente automatizzato sia il processo della sterilizzazione che quello della movimentazione del prodotto.

In queste apparecchiature a pressione gioca un ruolo importante la progettazione dei sistemi di protezione contro le sovrapressioni , le sovratemperature e di chiusura ed apertura delle portelle che richiedono l'utilizzo di sistemi omologati.

Queste soluzioni, dal punto di vista della sicurezza, prevedono sia le sicurezze della singola macchina, intese come accessori previsti dalla normativa PED (strumenti di controllo e rilevamento di temperatura, pressione, livello, dispositivi di sicurezza per la chiusura ed apertura di coperchi e portelle) che quelle della sequenza di funzionamento dell'intero processo produttivo e delle loro sicurezze. In particolare si riferiscono alle apparecchiature ed alle sicurezze funzionali dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili inseriti nel contesto impiantistico generale.

È nella programmazione dei cicli di gestione delle sequenze di processo che và posta molta attenzione in quanto un'errata programmazione può portare a degli incidenti piuttosto gravi.

Infatti consideriamo un impianto a ciclo continuo, costituito da 4 autoclavi che funzionano in parallelo. Il ciclo di produzione delle quattro autoclavi è gestito da un PLC generale che comanda l'impianto di automazione della navetta di carico e scarico delle autoclavi (fig. 10).



Fig. 8 - Autoclave e navetta di carico



Fig. 9 - FLC generale comando autoclavi

Il prodotto in scatola da elaborare viene mosso da un nastro trasportatore (fig. 11) che lo deposita nei cestoni che prelevati dalla navetta vengono introdotti nella autoclave. La movimentazione di questi cestoni viene gestita dalla navetta dotata di un proprio PLC e software di gestione dell'impianto che verifica i programmi di lavorazione delle varie autoclavi e ne effettua il carico e scarico delle stesse.

Questo processo elaborativo di gestione delle quattro macchine è molto importante in quanto può interferire con il programma di apertura e chiusura delle portelle delle autoclavi, gestite dal PLC della singola macchina, provocando indesiderati incidenti. Perciò diventa molto importante l'affidabilità e la funzionalità dei sistemi di blocco meccanici delle portelle, prescritti dalla normativa PED, ed imposti dall'analisi dei rischi che il costruttore dell'apparecchiatura a pressione deve effettuare per eliminare tutti i rischi dovuti ad aperture spontanee ed indesiderate dei portelli.

Il funzionamento di ogni singola macchina è programmata da un proprio PLC che gestisce il ciclo della singola autoclave non solo per quanto riguarda la elaborazione della ricetta di lavoro

ma anche tutte le sicurezza elettriche ed elettroniche. Infatti l'autoclave è dotata di dispositivi obbligatori, previsti dalla PED, quali gli accessori di controllo, protezione e sicurezza (manometro, termometro, pressostato - vedi fig. 12) per il controllo della pressione e temperatura interna.

La sicurezza per l'apertura e chiusura della portella, che in questo caso sono del tipo a manovra unica, è affidata a due microswitch di fine corsa (fig. 13). e ad un pistoncino che funge da fermo meccanico comandato dalla pressione interna all'autoclave (fig. 14).



Fig. 10 - Microswitch di fine corsa



Fig. 11 - Fermo blocco meccanico

Il sistema di gestione è governato da un software di supervisione dell'impianto che, oltre a consentire l'esecuzione coordinata di tutte le missioni, offre la possibilità agli operatori responsabili di intervenire tramite apposite chiavi di accesso, direttamente sulle chiamate di priorità delle macchine assicurando un ulteriore grado di flessibilità.

Il quadro elettrico generale di comando e regolazione contenente tutte le apparecchiature di gestione delle sequenze di processo comandate da PLC con interfaccia videografico touchscreen per la memorizzazione e la modifica dei cicli di sterilizzazione e la visualizzazione di tutte le variabili. Richiamo in chiave grafica dei processi.

5.2 CONTROLLO DELLE CONDIZIONI DI SICUREZZA

Per agevolare l'operatore nella gestione della macchina è presente una pagina, dove è visibile lo stato di tutti i controlli che concorrono a determinare le condizioni di sicurezza.

Tali condizioni sono indispensabili per avere l'abilitazione all'apertura/chiusura della macchina.

Se tutte le voci sono OK la macchina è in sicurezza e si accende la spia verde sulla pulsantiera.

6. CONCLUSIONI

Come si è potuto verificare queste tipologie di attrezzature a pressione rivestono particolare interesse legato alla sicurezza dei lavoratori che operano in questo settore. Al personale responsabile dell'esercizio di tali impianti è affidata la gestione in sicurezza di questo tipo di attrezzature a pressione. Ad essi è affidata anche la programmazione della manutenzione e verifica della funzionalità degli accessori di sicurezza, sia meccanici che elettrici ed elettronici, necessaria alla protezione dei lavoratori e dell'ambiente di lavoro secondo quanto previsto dalla normativa sulla salute e sicurezza nei luoghi di lavoro.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] Analisi del ciclo produttivo del settore tessile laniero. Dipartimento Arpa di Biella e Vercelli.

[2] Quaderni di Tecnologia Tessile.

[3] Then – Airflow Synergy.

[4] Scheda 28 –Lavorazione tintura in pezza – Macchina overflow a pressione.

sessione POSTER

4
Le fasi essenziali di vita di una attrezzatura/insieme a pressione

*G. Inguì**

**Libero Professionista*

1. SOMMARIO

Le attrezzature e gli insiemi a pressione (A/IP) occupano un posto predominante nel mondo industriale e dei grandi impianti in generale, ma sono diffusi anche in piccoli impianti civili e si possono persino trovare in singole abitazioni. Pertanto essi devono essere scrupolosamente gestiti nell'arco della loro vita ai fini della salvaguardia della sicurezza delle persone, degli animali e dell'integrità delle cose in qualsiasi luogo essi siano installati, sia esso di lavoro che di vita privata e sociale.

La presente memoria, alla luce della nuova filosofia tecnica e giuridica introdotta nel nostro ordinamento giuridico dal Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 di recepimento della direttiva 97/23/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 29 maggio 1997 per il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri in materia di attrezzature a pressione (PED), del decreto ministeriale n. 329/2004 *Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del D.Lgs. 25 febbraio 2000, n. 93 e del recente Decreto Legislativo 9 aprile 2008 , n. 81 "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro"* vuole essere una riflessione sui momenti fondamentali di vita di una attrezzatura a pressione, sia essa concepita come prodotto a sé stante, sia come prodotto utilizzato in ambienti di lavoro (attrezzatura di lavoro).

Tali momenti o fasi non hanno solo una valenza tecnico-gestionale, ma anche amministrativa, affinché le attrezzature stesse vengano monitorate per una corretta gestione in sicurezza. Sinteticamente si possono individuare le seguenti fasi fondamentali: progettazione, fabbricazione, installazione, messa in servizio, verifiche o controlli periodici, verifiche di riqualificazione periodica (verifiche di funzionamento e verifiche di integrità), verifiche straordinarie.

Per diverse ed evidenti motivazioni non verrà trattato l'argomento relativo ai soggetti deputati ad eseguire verifiche e controlli con riferimento al panorama italiano.

2. GENERALITÀ

Generalmente la legislazione a carattere speciale prescinde da quella a carattere generale, dettando disposizioni valide solo per il proprio ambito. Ma quando la prima (art. 71 del D. Lgs. n. 81/2008 e s.m.i.) ha il compito di disciplinare l'uso, in qualità di attrezzature di lavoro, delle stesse A/IP per le quali la seconda (D.M. n. 329/2004) assicura la permanenza dei requisiti di sicurezza nell'utilizzazione come prodotti a sé stanti, non può che estendere e specializzare, a fini di sicurezza, le disposizioni della seconda. Se così non fosse, si avrebbe una legislazione speciale che garantisce livelli di sicurezza inferiori a quelli imposti dalla legislazione che disciplina il solo prodotto.

Pertanto, nel caso in cui la scelta di principio della legislazione speciale fosse quella di fondarsi sulle stesse basi della legislazione generale esistente ed ampliarla per la specifica finalità, le due

legislazioni non dovrebbe mostrare punti di contrasto. Al fine di essere fondamento e riferimento per la legislazione speciale e di fugare tutti i dubbi interpretativi e applicativi rilevati in questi ultimi anni, si ritiene che il D.M. n. 329/2004 debba essere sottoposto ad una rivisitazione.

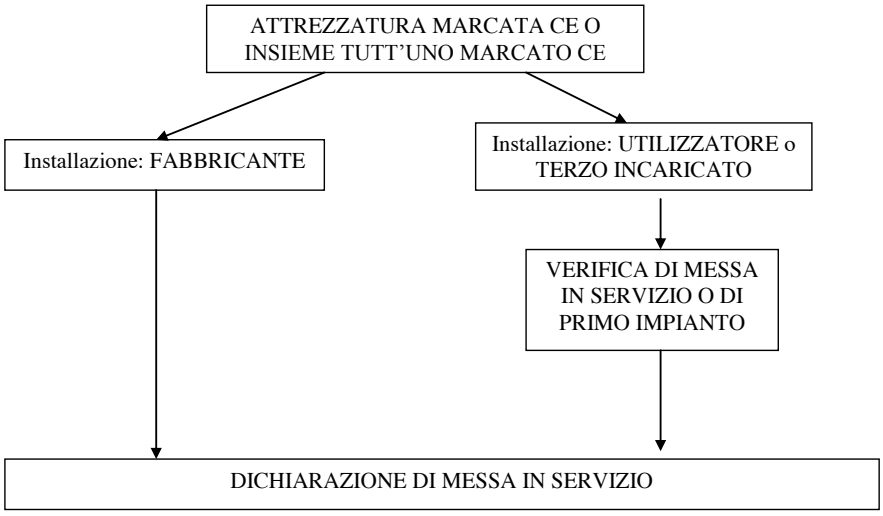
Viceversa, nel caso in cui la legislazione speciale volesse regolamentare l'uso delle A/IP negli ambienti di lavoro, astraendo totalmente dalla legislazione di prodotto esistente, non si considera esaustivo l'attuale l'art. 71 del D. Lgs. n. 81/2008, anzi si evidenziano grandi difficoltà per la sua futura attuazione pratica, come già rilevato.

In ultimo, ma non per importanza, tra i limiti dell'art. 71 si mette in evidenza la non completa separazione tra vigilanza ed esecuzione delle verifiche periodiche e quindi di ruoli, ciò a pregiudizio della trasparenza delle verifiche e della terzietà nel caso in cui uno stesso soggetto esegua entrambe le attività. La diretta conseguenza di tale imperfetta separazione è quella di avere sul mercato soggetti pubblici e privati che efettuano verifiche periodiche, con evidente menomazione della concorrenza.

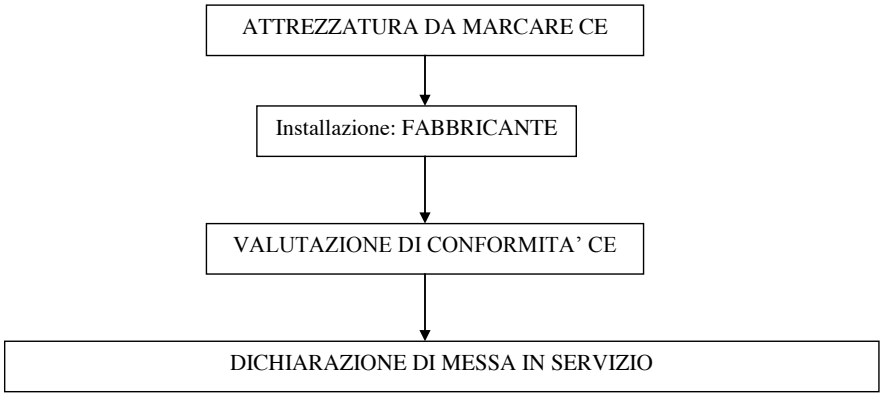
Nel tentativo di individuare un parallelismo e una omogeneità di base tra le due vigenti tipologie di legislazione, è stata affrontata una lettura critica dei dettati legislativi sopra citati e si è tentato di estrapolare valide conclusioni con l'intento di pervenire ad una coerenza tecnica nell'applicazione degli stessi.

Una estrema sintesi di ciò è presentata negli schemi di fig. 12 e 13.

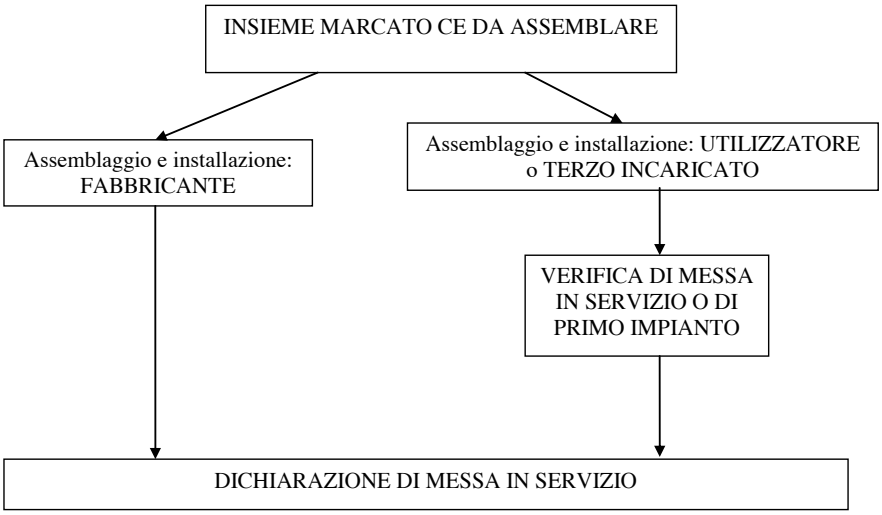
MESSA IN SERVIZIO DI ATTREZZATURE/INSIEMI A PRESSIONE REGOLAMENTATI DAL D.M. N. 329/2004



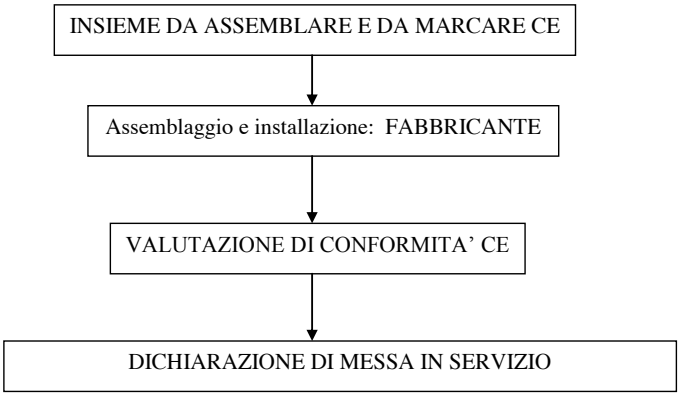
Caso n. 1



Caso n. 2



Caso n. 3



Caso n. 4

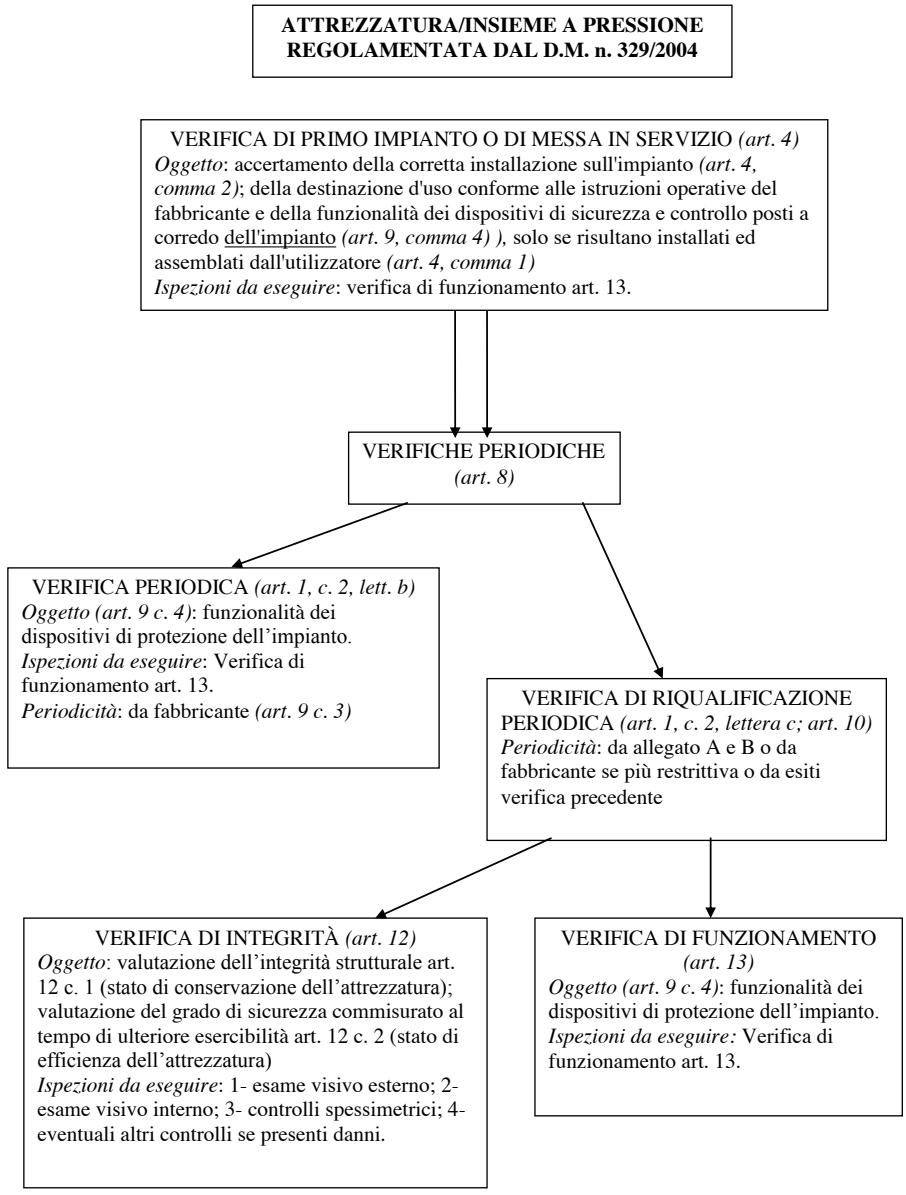


Figura n. 12

3. VERIFICHE DI INTEGRITÀ AI SENSI DEL D.M. N. 329/2004

CASO A): A/IP completamente ispezionabile sia dall'interno che dall'esterno.

1. esame visivo esterno
2. esame visivo interno
3. spessimetria
4. se presenti danni, altri controlli, a cui seguirà o il ripristino dell'integrità strutturale o idonea valutazione dell'ulteriore esercibilità (riduzione del periodo di scadenza della successiva verifica di integrità ovvero declassificazione dell'attrezzatura con riduzione dei limiti superiori dei parametri di esercizio)

CASO B): A/IP non ispezionabile o parzialmente ispezionabile, dall'interno e/o dall'esterno.

1. esame visivo esterno totale o per la parte ispezionabile
2. esame visivo interno totale o per la parte ispezionabile
3. spessimetria
4. prova idraulica per le camere non ispezionabili totalmente (in casi eccezionali può essere sostituita con prova di pressione con aria o gas inerte, con la predisposizione da parte dell'utente di opportuni provvedimenti di cautela e misure previsti per legge)
5. se presenti danni, altri controlli, a cui seguirà o il ripristino dell'integrità strutturale o idonea valutazione dell'ulteriore esercibilità (riduzione del periodo di scadenza della successiva verifica di integrità ovvero declassificazione dell'attrezzatura con riduzione dei limiti di esercizio)

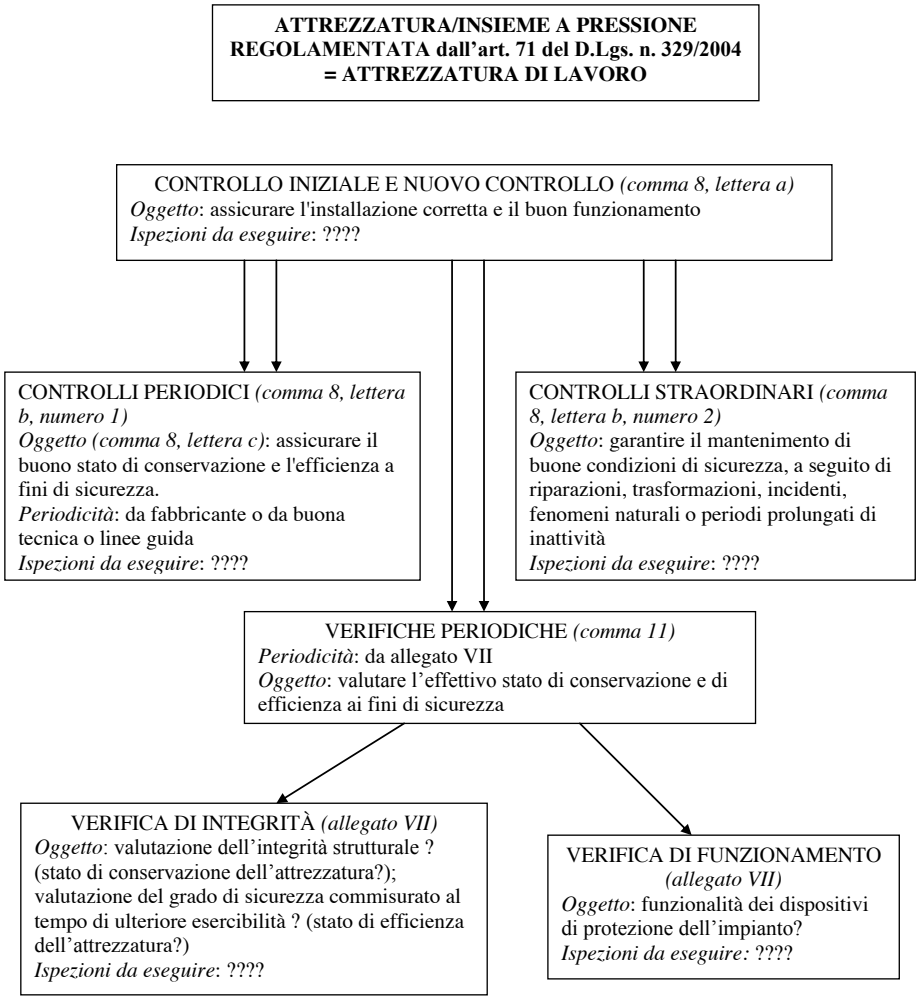


Figura n. 13

5
La rappresentazione digitale parametrica di attrezzature a pressione

*A. Tonti**
*P. Bragatto***
* *ISPESL - DCC, Roma*
** *ISPESL - DIPIA, Monteporzio Catone (RM)*

1. SOMMARIO

L'attività di certificazione degli apparecchi in pressione è regolata da un protocollo consolidato ormai da molti anni. Nel medesimo periodo l'attività di progettazione meccanica è molto cambiata, in particolare nell'ultimo decennio. Si è passati in successione dalla rappresentazione cartacea alla rappresentazione digitale prima 2D e poi 3D, con prodotti CAD di tipo relativamente semplice per arrivare alla rappresentazione digitale di oggetti parametrici tridimensionali, con prodotti CAD complessi, inclusi il CATIA© della Dassault Sistemes.

I principali obiettivi del lavoro sono:

- Aumentare l'efficacia dell'attività di certificazione sfruttando strumenti di rappresentazione digitale di oggetti meccanici
- Creare rappresentazioni digitali 3D delle attrezzature da certificare, basandosi solo sulle informazioni fornite con la documentazione richiesta nella procedura.
- Avere uno strumento condiviso fra certificatore e progettista, che consenta in particolare di valutare dinamicamente l'effetto sulla sicurezza del recipiente al variare dei parametri geometrici e tecnologici (materiali).
- Rendere più fruibile la conoscenza contenuta nel corpo di regole collegandola ad una rappresentazione grafica più attraente e più potente (grazie alla parametrizzazione)

Allo scopo di realizzare gli obiettivi è stato sviluppato un software ad hoc che riceve in input i parametri costruttivi delle singole membrature, attenendosi al form tradizionale. Il software produce una matrice di parametri che viene utilizzata dal software CATIA© per generare per ogni membratura una "parte" 3D. Le membrature vengono assemblate come parti distinte. Per apertura e tronchetti che devono essere applicati a fasciami e fondi, le possibilità di modellazione digitale del CATIA© (unione, intersezione, estrusione ecc.) vengono meglio sfruttate.

Il software sviluppato è stato messo a disposizione dei certificatori. L'interfaccia utente ricalca quella dei form già utilizzati per la procedura cartacea. Catia, con le sue possibilità di calcolo resta come in un "black box". Il certificatore non deve imparare strumenti difficili, ma ha solo i vantaggi di una rappresentazione più potente delle parti. Il software è reso accessibile attraverso la intranet dell'Istituto ed è accessibile da circa cento certificatori nelle quaranta sedi distribuite in Italia.

2. INTRODUZIONE

Gli apparecchi in pressione sono componenti essenziali in tutta l'industria di Processo, in particolare nei settori energia, oil & gas, chimica di base, chimica fine e farmaceutica, petrolchimica). La verifica dei criteri di sicurezza nella progettazione, realizzazione ed esercizio

degli apparecchi in pressione ha da sempre avuto un ruolo essenziale nella prevenzione degli infortuni sul lavoro e l'attività di certificazione, seppure con denominazione o modalità differenti è stata svolta dall'ISPESL con continuità da oltre ottanta anni. Le famose regole per le regole di verifica di stabilità dei recipienti in pressioni (sottoposti o meno alla fiamma) VSG e VSR sono un concentrato dell' enorme patrimonio conoscitivo raccolto in tanti anni di attività nel settore della componentistica industriale. Il D.lgs. 81/08. testo unico sulla sicurezza del lavoro, vede gli apparecchi in pressione come attrezzature di lavoro messe a disposizione dei lavoratori e ne richiede la conformità alle specifiche disposizioni legislative e regolamentari di recepimento delle direttive comunitarie di prodotto (art. 70). Negli stabilimenti soggetti al D.Lgs 334/99 la sicurezza dei componenti in pressione è anche una condizione necessaria per la prevenzione degli incidenti rilevanti. Per questi motivi vengono dedicati particolari sforzi perché la certificazione degli apparecchi in pressione sia sempre allineata gli sviluppi tecnologici. Nel settore degli apparecchi in pressione sono intervenute molte innovazioni in materia di materiali, tecniche costruttive e modalità di esercizio, che sono state recepite nell'attività di certificazione. Un importante cambiamento tecnologico che negli in anni recenti ha avuto un notevole impatto sul settore è quello della progettazione assistita dal computer (CAD computer aided design). Nato inizialmente come semplice supporto informatico al disegno meccanico, il CAD si è di seguito evoluto successivamente con la modellazione geometrica tridimensionale delle parti, la rappresentazione parametrica delle parti, alla definizione di caratteristiche funzionali associate alle geometrie. Oggi il CAD è uno strumento completo di progettazione, che consente anche di definire le regole geometriche e funzionali alle quali devono conformarsi le parti progettate.

Va sottolineato che le regole tecniche sono l'essenza e la sintesi della conoscenza e dell'esperienza. La possibilità di informatizzare le regole tecniche in modo corretto ed efficiente significa progettazione più veloce, qualità superiore e controllo sui costi imprevisti dovuti ad errori progettuali. Per questa ragione i sistemi CAD che possono definire e gestire insiemi di regole, vengono chiamati Knowledge Based CAD KB-CAD. Ancora più calzante sarebbe il termine Knowledege Based Engineering KBE, per questa gestione delle regole può accompagnare tutte le fasi di un progetto. Gli utilizzatori, infatti, non solo progettano il pezzo ma anche rendono esplicite attraverso le regole, il patrimonio di conoscenze ed esperienze specifiche sul quale si base l'attività di progettazione. In questo caso la rappresentazione digitale delle parti comprende, oltre alla geometria, anche relazione e regole ed ha quindi diventa una vera rappresentazione della conoscenza. Le applicazioni KBE trovano già moltissime applicazioni nella progettazione meccanica, automobilistica ed aeronautica e la ricerca propone continuamente nuove opportunità, come documentato nelle recente rassegna di Liu & Boyle [1].

Poiché i sistemi CAD più o meno avanzati sono ormai una risorsa comune a tutti i costruttori di apparecchi in pressione è ragionevole pensare anche l'attività di certificazione debba avvalersi dalla possibilità di avere rappresentazione digitali "intelligenti" dei componenti in pressione. La stessa possibilità di gestire regole, può essere convenientemente valorizzata, inserendo proprio le regole ISPESL VSR e VSG, armonizzate con la normativa europea ed utilizzate da tutta l'industria italiana. Nel presente lavoro viene descritta una applicazione sviluppato di recente che sfrutta le potenzialità del CAD per rendere ancora più efficace l'attività di certificazione degli apparecchi. Nato come prototipo in una ricerca sulla sicurezza degli impianti a rischio di incidente rilevante [2] la soluzione presentata nel presente articolo è stata successivamente ingegnerizzata ed integrata con il sistema in uso nel Dipartimento Certificazione e Controllo Conformità dell'ISPESL ed è pronta per l'utilizzo operativo. Il lavoro si articola nel modo seguente: nel capitolo 2 si descrive molto brevemente il modello informatico ed organizzativo adottato dall'ISPESL per la certificazione degli apparecchi in pressione, evidenziando le esigenze alle quali si è risposto con lo sviluppo qui presentato. Nel capitolo 3 si delineano gli obiettivi definiti per lo sviluppo. Nel capitolo 4 si motivano le scelte tecnologiche compiute, facendo riferimento anche agli sviluppi recenti riportati in letteratura. Nel capitolo 5 si discutono le caratteristiche del software sviluppato. Nel capitolo 6 si discutono i risultati ottenuti, con le difficoltà incontrate e risolte. Infine nel capito 7 si discutono i possibili sviluppi del sistema.

3. L'ATTIVITÀ DI CERTIFICAZIONE ISPESL

La progettazione di impianti ed attrezzature di lavoro deve rispondere ad una serie di criteri o requisiti minimi di sicurezza, sulla base dei quali gli impianti vengono approvati dalle autorità competenti. Tra i componenti oggetto di particolari criteri o requisiti di sicurezza rientrano, ad esempio, gli impianti elettrici, gli impianti di protezione contro le scariche atmosferiche e le cariche elettrostatiche, i recipienti ed i serbatoi, le tubazioni, gli apparecchi in pressione e gli apparecchi destinati a sostanze corrosive.

I requisiti possono riguardare i singoli apparecchi presenti nell'impianto, la loro disposizione ed i loro collegamenti, i processi, le sostanze, i materiali, i sistemi di sicurezza, ecc. Per il progettista i criteri minimi di sicurezza possono lasciare un margine di libertà molto ampio, poiché non costituiscono esplicite indicazioni costruttive per quanto fissato dal progettista, ma stabiliscono semplicemente sotto quali condizioni, il progetto possa essere considerato sicuro. Nella maggior parte dei casi, infatti, i criteri di sicurezza si verificano solo dopo la prima fase di progettazione. Al fine di guidare il lavoro del progettista in tutti i suoi passi, ed evitare che il progetto debba essere riconsiderato dopo che è stato verificato il mancato rispetto dei requisiti di sicurezza, vengono definiti nei vari ambiti applicativi corpi di regole tecniche di verifica, che definiscono, anche a livello di dettaglio, le caratteristiche geometriche delle parti da realizzare in modo da avere sempre il rispetto dei requisiti minimi.

Le regole tecniche non hanno mai caratteristiche di univocità, poiché dal medesimo criterio possono discendere regole pratiche differenti. Le regole tecniche, nate per la verifica, sono così dettagliate che possono essere usate direttamente in progettazione. Esse, anche se vincolano la libertà del progettista, consentono di avere una progettazione più rapida ed efficiente, con diretto raggiungimento della sicurezza dell'impianto. Pervenire agli obiettivi di sicurezza richiesti senza disporre di regole concrete sulle quali poggiarsi è possibile, ma richiede uno sforzo molto maggiore e lascia maggiori margini d'errore.

Anche il lavoro di verifica e approvazione che deve essere svolto dalle autorità competenti in materia di rischio di incidenti rilevanti, viene facilitato dalla presenza di raccolte normative rigorosamente codificate più che da criteri generali di tipo flessibili.

In base al DPCM 31/03/89 sui criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza l'adozione di standard progettuali per serbatoi e per recipienti è un elemento di rilievo ai fini della valutazione della completezza ed adeguatezza dei contenuti dei rapporti di sicurezza

Da un punto di vista logico è evidente che le regole discendono dai criteri; ma non è detto che ciò sia evidente. In molti casi, infatti, le regole vengono semplicemente imposte senza motivarle in dettaglio ai soggetti obbligati a rispettarle. Questo fatto vale tanto per gli standard aziendali o gli standard di settore quanto per le norme nazionali. I criteri generali vengono così presentati in forma esplicita solo in caso si verifichino situazioni di interscambio con ambiti dove si applicano regole formalmente differenti, seppure derivanti dagli stessi criteri generali. In questo caso i criteri all'utente possono, erroneamente, apparire come condizioni ulteriori alle regole tecniche.

La distinzione fra regole e criteri non è per nulla accademica. Regole tecniche ben definite e collaudate, infatti, implicano, a differenza dei criteri base, la possibilità di "automatizzare" il rispetto delle regole stesse, in modo che non sia neppure possibile disegnare qualcosa di difforme ad esse. In tal caso il progettista sarebbe obbligato a disegnare componenti ed impianti secondo le regole definite e la sicurezza diventerebbe una caratteristica intrinseca di quanto disegnato. Per realizzare tutto questo è necessario che la gestione delle regole passi dalla responsabilità del singolo progettista ai sistemi informatici che già automatizzano quasi tutte le fasi del ciclo di progettazione.

3.1. La certificazione nel settore delle attrezzature a pressione

L'insieme delle norme di sicurezza è il codice VSR, sviluppato in Italia nei primi anni settanta da costruttori ed enti pubblici, in attuazione della legislazione sulla verifica degli apparecchi a pressione. Il codice VSR è analogo a altri codici sviluppati dai principali paesi industrializzati, come il BS5500 nel Regno Unito, ASME VIII Div. 1 in USA e AD-MERKBLATT in Germania. Per 30 anni, ISPESL è stato incaricato di gestire e aggiornare il codice VSR in Italia. Nel 1997, la Commissione europea ha pubblicato la direttiva PED 97/23/CE per consentire il libero scambio

di attrezzature a pressione in tutta l'Unione europea. La direttiva non impone alcun codice nazionale, ma si limita a definire i criteri generali, ovvero i requisiti essenziali di sicurezza, che devono essere verificati. La Raccolta VSR è stata armonizzata con la direttiva PED, ed è oggi ampiamente utilizzata in Italia per la progettazione e la certificazione di attrezzature a pressione.

L'attività di certificazione è suddivisa in due tipologie ben distinte: attività omologativa, relativa ad attrezzature a pressione già oggetto di approvazione secondo la normativa nazionale ed oggi oggetto di riparazione e/o modifiche di lieve entità; attività di certificazione secondo direttiva PED, per attrezzature a pressione completamente nuove, o che sono oggetto di interventi non trascurabili di modifica.

La distinzione è essenziale, in quanto le regole comunitarie sono diverse da quelle nazionali. Le verifiche da effettuare secondo la normativa nazionale seguono le regole tecniche contenute nelle Raccolte ISPESL VSR e VSG, mentre quello effettuate secondo PED, seguono le Raccolte emendate PED ovvero le Raccomandazioni CTI per l'utilizzo delle Raccolte VSR/VSG con la PED [3-5].

Al fine di rispettare la distinzione sopra citata, l'applicativo VSR/VSG consente di scegliere la verifica secondo:

1. VSR per attrezzature a pressione
2. VSG per generatori di vapore
3. VSR PED per attrezzature a pressione conformi alla direttiva PED
4. VSG PED per generatori di vapore conformi alla direttiva PED.

A livello organizzativo occorre precisare che il tecnico che esegue le verifiche, opera normalmente con il supporto della documentazione cartacea trasmessa dall'azienda richiedente. Ovviamente non è agevole dover operare su procedure informatizzate trascrivendo dati ottenuti soltanto su supporto cartaceo. Una volta inseriti tali dati, la gestione tecnico/amministrativa della pratica diventa completamente automatizzata ed affidata a procedure informatiche (oltre all'applicativo VSR/VSG, la parte amministrativa viene gestita con un'altra applicazione denominata SIDPI).

4. OBIETTIVI

L'obiettivo della ricerca presentata in questo articolo è la definizione di un sistema di progettazione knwledge-based (KB) che sia di supporto ai tecnici addetti all'attività di certificazione; tale sistema deve consentire di verificare il rispetto delle norme in materia di costruzione di attrezzature a pressione. Con lo strumento descritto in questo articolo, una volta costruito il modello relativo all'attrezzatura a pressione in esame, può essere verificata la rispondenza alla Raccolta VSR. Dato il modello di attrezzatura, come descritto nel set di regole VSR o VSG, la geometria ed i vincoli funzionali possono essere verificati tramite il modulo KBE del sistema CAD. Il controllo viene eseguito in ambiente semi-automatico, ovvero è in grado di evidenziare possibili non conformità all'utente, che può decidere di attuare interventi correttivi.

Gli obiettivi generali di un'applicazione che sfrutti la rappresentazione digitale delle parti meccaniche includono:

- Aumentare l'efficacia dell'attività di certificazione sfruttando strumenti di rappresentazione digitale di oggetti meccanici
- Creare rappresentazioni digitali 3D delle attrezzature da certificare, basandosi solo sulle informazioni fornite con la documentazione richiesta nella procedura.
- Avere uno strumento condiviso fra certificatore e progettista, che consenta in particolare di valutare dinamicamente l'effetto sulla sicurezza del recipiente al variare dei parametri geometrici e tecnologici (materiali).
- Rendere più fruibile la conoscenza contenuta nel corpo di regole collegandola ad una rappresentazione grafica più attraente e più potente (grazie alla parametrizzazione)
- Applicare modelli dinamici, con simulazione dei meccanismi di degrado

In tale ambito si inseriscono i prodotti per il controllo del ciclo di vita delle attrezzature, che consentono simulazioni sui sistemi di produzione più complessi. Le possibilità includono anche la progettazione di assemblati senza limiti di complessità, la progettazione di superfici e forme

libere, la gestione delle varie fasi produzione, montaggio, smontaggio ecc.

Il sistema può anche essere accoppiato con solutori agli elementi finiti, completando, quindi, il quadro complessivo delle modalità di verifica previste dai codici di calcolo, inclusa la VSR. Per quanto riguarda l'approccio multi codice (applicazione simultanea di più codici), si tratta di qualcosa ancora da sperimentare, ma sempre più richiesta. Spesso, infatti, si richiede di progettare secondo codici internazionali e di verificare secondo lo standard nazionale (VSR). A tal fine non deve essere dimenticato che la VSR e la VSG sono codici di verifica e non di progettazione.

5. METODI E TECNOLOGIE UTILIZZATE

Numerosi prodotti KBE sono ormai reperibili sul mercato. I sistemi KBE offrono un supporto migliorato per la descrizione e l'elaborazione di modelli di prodotti nell'intero ciclo di vita del prodotto, e consentono di automatizzare diversi tipi di conoscenza: i dati geometrici, schede tecniche, normative e standard e orientamenti sulle migliori pratiche derivanti da esperienze passate. Un esempio di sistema KBE molto conosciuto in vari settori dell'ingegneria meccanica è il CATIA V5© sviluppato dalla Dassault Systemes. Con strumenti come CATIA V5© è possibile gestire per tutte la conoscenza contenuta in un progetto: forma, funzioni, vincoli e standard. Con tali sistemi le regole non vengono definite una volta per tutte da chi sviluppa e fornisce il software applicativo CAD, ma ogni gruppo omogeneo di utilizzatori può definire e condividere le proprie "regole" che comprendono non sole le norme e gli standard cogenti ma anche gli standard aziendali, le norme interne e tutte le regole implicite derivanti dall'esperienza dell'azienda. Le parti rispondono automaticamente alle regole definite a priori dal supervisore del progettista o dal progettista stesso. Le incongruenze in parti progettate con sistemi precedenti sono segnalate e trattate.

5.1. Settori di applicazioni dei KBE

Il settore dove da più lungo tempo si applicano le soluzioni KBE è quello dell'automobile, seguito da quello dell'aeronautica. In questi settori la quantità di regole e vincoli da seguire e la necessità di rispondere in tempi molto brevi alle richieste del mercato ha dato un particolare impulso. Per quanto riguarda la progettazione dei componenti d'impianto il settore sembra molto più indietro. È importante ricordare come i sistemi per KBE presuppongono l'esistenza di regole di dettaglio ben definite, mentre i requisiti o criteri più generali non possono entrare nella gestione automatica delle regole. Nel contesto dell' applicazione ai componenti in pressione questo è un vantaggio perché già si dispone di un insieme di regole perfettamente definito, come discusso in un precedente lavoro di Ansaldi [6].

Il settore specifico degli apparecchi in pressione si presta per un'esemplificazione ed una sperimentazione dell'applicazione automatizzata di regole di sicurezza in fase di progettazione. La comune base scientifica di queste regole è il ricorso a formule che rappresentano, quando possibile, soluzioni del calcolo strutturale nel dominio di applicazione, nonché a soluzioni empiriche. In un recente lavoro di Camossi [7] è stata dimostrata la possibilità di formalizzare in una rappresentazione ontologica gli standard che sintetizzano la conoscenza sugli apparecchi in pressione. Questo approccio è ripreso, per altre applicazioni, anche dal lavoro di Toro [8] dove si discutono i vantaggi degli standard ingegneristici come linee guida per una modellazione di dominio basata sulla conoscenza. I recenti avanzamenti della ricerca hanno dunque confermato l'intuizione iniziale presente nel citato lavoro di Bragatto [2] che aveva sviluppato un prototipo per la progettazione di apparecchi in pressione basato sulle regole VSR, sfruttando le possibilità di CATIA V5©. La trasposizione dell'intero corpo di regole tecniche VSR e VSG all'interno di un sistema KBE, rappresenta una soluzione molto promettente per fornire ai certificatori strumenti operativi ai fini di rispondere a criteri generali di sicurezza. Come confermate nella letteratura sopra citata e nell'esperienza di sviluppo prototipi, le tecnologie KBE forniscono ormai un supporto così robusto, da potere proporre anche l'uso in attività di certificazione.

In particolare CATIA V5 è uno strumento estremamente potente, ma richiede competenze specialistiche che non sono necessariamente presenti nella formazione del personale preposto ad effettuare le verifiche. Altri aspetti hanno suggerito un approccio particolare e personalizzato

allo strumento CAD prescelto:

- lo stato di documentazione dei progetti di impianti
- l'eterogeneità della documentazione CAD disponibile
- la difficoltà di estrarre dati in maniera automatizzata dalla documentazione
- i costi dei sistemi CAD che ne limitano comunque l'uso se paragonati ai costi di applicazioni più tradizionali
- l'opportunità di distinguere un metodo semplice e di ampia diffusione per l' immissione dei dati di impianto, da quella di esecuzione vera e propria della verifica

6. CARATTERISTICHE DEL SOFTWARE

Lo strumento è volto a sostenere gli ispettori che hanno ricevuto la pratica dell'apparecchio da costruire, con tutti i parametri in forma numerica. Per questo motivo, si è preferito lasciare l'utente a ricostruire una rappresentazione di sintesi digitale del materiale, in modo manuale, ma assistito, utilizzando solo i dati forniti dal costruttore attraverso il modulo standard utilizzato per la richiesta di certificazione. Un modello sintetico attrezzatura è creato nel sistema CAD, e quindi le regole VSR possono essere controllate automaticamente. Di seguito vengono descritte le caratteristiche del software.

6.1. Caratteristiche generali

Il software è organizzato con un'applicazione sviluppata in linguaggio VB, che si interfaccia al CATIA, ma che può comunque anche essere utilizzata da sola. È previsto l'utilizzo in rete da più postazioni di lavoro in contemporanea. Ogni applicazione presente sulla singola postazione attraverso CATIA accede sia al database degli apparecchi, sia al database delle regole. Nel primo sono conservati i modelli dei vari apparecchi certificati e da certificare. Nel secondo sono conservate le regole VSR e VSG. L'utente "vede" solo l'applicazione che accedendo alle risorse a disposizione (database e motore di calcolo di CATIA) genera la rappresentazione digitale dell'apparecchio verificandone in parallelo la congruenza con le regole di stabilità. Nella Figura 1 si riporta uno schema sintetico dell'architettura adottata.

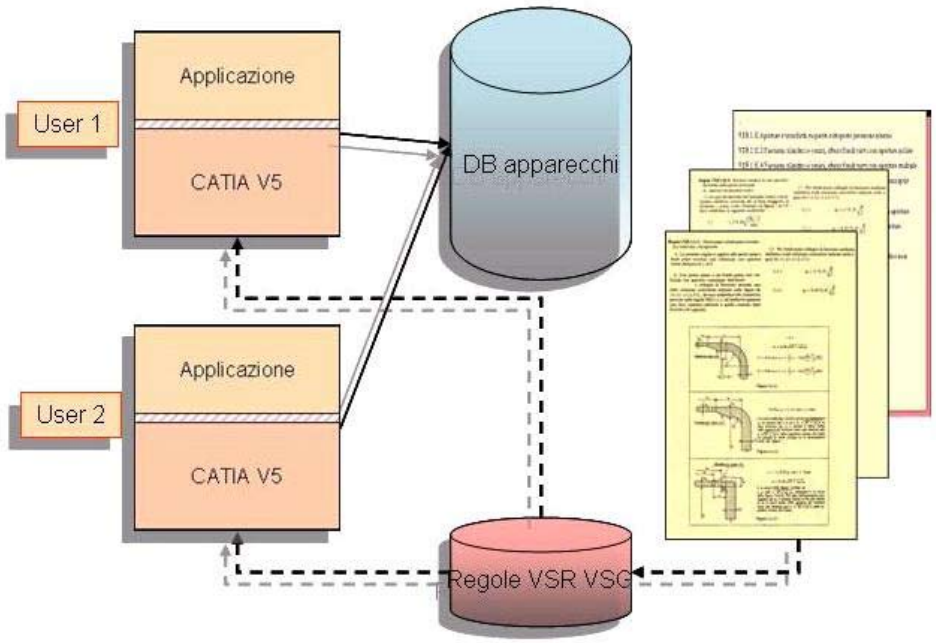


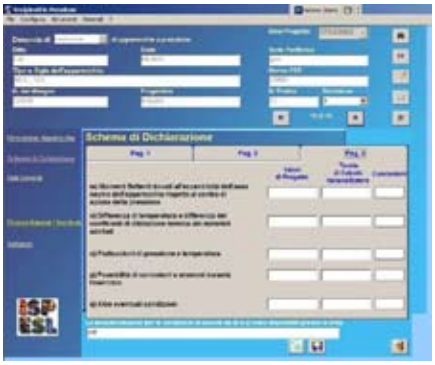
Figura 1: Architettura del software

6.2 Caratteristiche dell'interfaccia utente

Dal punto di vista dell' interfaccia utente il software riceve in input i parametri costruttivi delle singole membrature, attenendosi al format tradizionale. Il software produce una matrice di parametri che viene utilizzata dal software CATIA V5© per generare per ogni membratura una "parte" 3D. Le membrature vengono assemblate come parti distinte. Per apertura e tronchetti che devono essere applicati a fasciami e fondi, le possibilità di modellazione digitale del CATIA V5© (unione, intersezione, estrusione ecc.) vengono meglio sfruttate.



2a Schermata di avvio



2b Introduzione dati secondo il modulo convenzionale



2c Introduzione guidata membrature con parametrizzazione secondo VSR



2d Assemblaggio delle diverse membrature in un unico recipiente.

Figura 2. Alcune schermate che illustrano il funzionamento dell'applicazione RP.

6.3. Caratteristiche tecniche di dettaglio

L'applicazione è articolata nei moduli di seguito indicati:

i. Applicazione "Recipienti in Pressione.exe" realizzata in VB, opera su piattaforma Windows, che tramite pannelli ed un Help interattivo guida un utente anche inesperto di come si debba condurre una verifica, o di come semplicemente si debbano applicare le regole VSR, nell'immissione dei dati caratteristici necessari alle verifiche.

ii. Applicazione realizzata in VB che, su Computer dotati di CATIA, permette di ristrutturare un elenco di membrature (al fine di permettere una futura espansione dell'applicazione relativa ai controlli di chiusura dei serbatoi), di trasferire le tabelle di progetto in un'area definita su disco, per il loro successivo riutilizzo, e di lanciare CATIA V5. Questo programma "progetto_v2.exe" può essere richiamato autonomamente.

iii. CATIA V5 genera un assieme contenente tutte le membrature definite, che possono essere sottoposte alle verifiche secondo le norme VSR, da parte di un operatore che abbia le sole competenze necessarie a muovere gli oggetti sullo schermo, assoggettarli

a vincoli di posizione relativa, ad applicare nelle posizioni corrette gli eventuali tronchetti e/o accessori (anch'essi regolati da parametri).

iv. L'applicazione possiede inoltre un Help contenente per ogni membratura tutta la documentazione normativa ad essa afferente, in formato jpg. Questo programma "help_v2.exe" può essere attivato separatamente dall'applicazione principale.

6.4. Gestione software delle membrature

Per limitare in maniera consistente le manualità a carico dell'operatore l'applicazione poggia su di una struttura di dati estremamente aperta, basata sulla modalità CATIA delle Tabelle di Progetto.

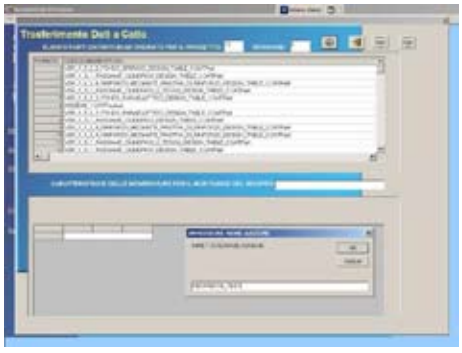
Un recipiente in pressione è realizzato assemblando una serie di elementi detti "membrature". Le membrature sono descritte completamente in termini di tipologie, di elementi di definizione, e delle loro relative relazioni dalle norme VSR.

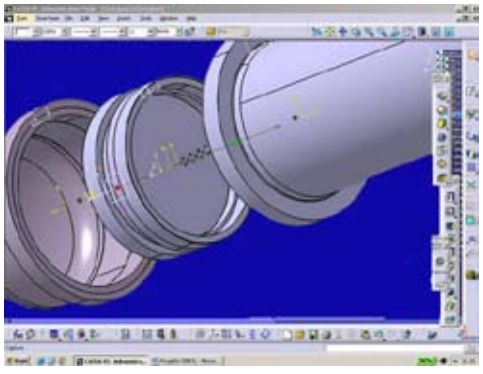
Una membratura può essere assimilata ad una Classe. Questa Classe è pienamente definita in termini di forma (statici) da attributi di tipo geometrico; ed in termini comportamentali (esercizio e/o prova) da attributi che descrivono i parametri fisici sia dei contenuti, che del contenitore.

Ad esempio, per un fondo paraellittico gli attributi geometrici saranno rappresentati da: diametro, spessore, altezza del colletto, raggio del fondo, raggio del raccordo al colletto; gli attributi del contenuto saranno le condizioni fisiche in cui esso opera, pressioni, temperature, aggressività, ecc. ; gli attributi del contenitore saranno quelli relativi al materiale di cui è composto, nelle condizioni imposte dal fluido e dal processo. Quindi al variare di uno qualsiasi dei parametri, secondo le relazioni stabilite, si ottiene un'istanza della Classe, che poi è l'oggetto da verificare.

Sono stati creati dei modelli virtuali con il sistema CAD CATIA V5 (o parti) rappresentanti gli archetipi delle classi o membrature delle norme VSR, rispettandone la nomenclatura. Gli archetipi descrivono tutte le varie configurazioni che sono descritte a parità di tipo di membratura, ad esempio nel caso dei fondi piani, (Norma VSR_L) esiste un archetipo per ogni fondo, ed in tal caso la nomenclatura è uguale alla figura. A questi archetipi sono state associate delle configurazioni di parametri geometrici, per rappresentare le varie istanze. Queste configurazioni rappresentano delle righe di fogli Excel, le cui colonne sono gli attributi descrittori dei parametri geometrici.

Invece i parametri fisici del contenitore e del contenuto non sono presenti nelle configurazioni, ma entrano in gioco in condizioni di verifica.





3a Trasferimento delle membrature a CATIA V5 3b Membrature assemblate rappresentate in CATIA V5

Figura 3 Integrazione fra l'applicazione RP CATIA V5©

7. RISULTATI

Il software sviluppato è stato messo a disposizione dei certificatori. L'interfaccia utente ricalca quella dei form già utilizzati per la procedura cartacea. Catia, con le sue possibilità di

calcolo resta come in un “black box”. Il certificatore non deve imparare strumenti difficili, ma ha solo i vantaggi di una rappresentazione più potente delle parti.

Il software è reso parzialmente accessibile attraverso l’intranet dell’Istituto ed è accessibile da circa cento certificatori nelle quaranta sedi distribuite in Italia. Attualmente sul sito preposto sono disponibili gli applicativi principali, le gestioni utenti, possono essere condivisi i dati sui materiali, ma non è possibile lanciare l’applicativo da postazione remota. Nelle figure 3 –a e –b. si mostra la fase di passaggio dall’applicazione RP al CATIA V5.

8. CONCLUSIONI

Con questa ricerca si è cercato di creare un ponte fra due mondi in apparenza abbastanza distanti quello della ricerca nell’ambito Information Technology sulla rappresentazione digitale degli oggetti ed in particolare di parti meccaniche e quella dell’attività di controllo della sicurezza. I passi successivi dalla prima dimostrazione di fattibilità alla concreta applicazione operativa possono essere considerati un esempio incoraggiante di trasferimento dei risultati fra ricerca ed enti di controllo.

L’applicativo sviluppato potrà consentire, tramite successivi sviluppi, di poter facilmente visualizzare gli effetti di carichi accidentali, come ad esempio il carico dovuto al verificarsi di eventi esterni (sisma, vento) oppure effetti del carico di punta. Tali aspetti non sono ancora coperti né da norme armonizzate, né da norme nazionali (neanche ASME), ma sono previsti dalla direttiva PED e quindi si prevede lo sviluppo di codici specifici in tempi relativamente brevi. Il sistema può mettere a disposizione dell’apposito modulo risolutivo dati per analisi non lineare ed analisi termica; il sistema sviluppato potrà essere un valido supporto per individuare i punti più sollecitati dal punto di vista termico. Difatti, il sistema può simulare la distribuzione delle temperature sulla base dei dati forniti e consentire di visualizzare direttamente sul modello generato le zone con temperature più elevate. Questo potrà essere di supporto per attività di life extension, come quelle attuate dall’ISPESL nel settore delle attrezzature a pressione soggette a degrado da scorrimento viscoso. In effetti, nella normativa di riferimento (attualmente la circolare ISPESL n.48/2003), non si è mai tenuto conto dei possibili picchi di temperatura per individuare le zone più sollecitate, ma soltanto della distribuzione e dell’eventuale concentrazione delle sollecitazioni. Questo in quanto gli strumenti fino ad oggi utilizzati non consentivano e non consentono ancora una simile verifica. In caso di verifica con metodi agli elementi finiti, la mesh utilizzata può essere collegata al modulo CATIA per l’implementazione della mesh stessa sul modello solido generato.

9. BIBLIOGRAFIA

1. Liu, S., Boyle, I.M. (2009) Engineering design: Perspectives, challenges, and recent avances Journal of Engineering Design, 20 (1), pp. 7-19.
2. P. Bragatto, F. Lupattelli, S. Ansaldi, P. Pittiglio, 2005 CAD knowledge based per gli impianti a rischio, Automazione e Strumentazione, 53, (7-8), 47-51
3. I.S.P.E.S.L. – “Raccolta VSR - Specificazioni tecniche applicative del DM del 21 novembre 1972 per la verifica della stabilità dei recipienti in pressione” – Revisione 1995
4. I.S.P.E.S.L. – “Raccolta VSG - Specificazioni tecniche applicative del DM del 21 novembre 1972 per l’impiego dei materiali nella costruzione degli apparecchi e sistemi in pressione” – Revisione 1995
5. I.S.P.E.S.L. – Circolare n.48/2003 - Procedura tecnica per le verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale
6. S. Ansaldi, E. Camossi, F. Giannini, M. Monti, P. Pittiglio, 2006 A knowledge based tool for risk prevention on pressure equipments, Computer-Aided Design & Applications, 3, 1-4, 99-108
7. Camossi,E. Giannini,F. Monti,M. Bragatto.P. Pittiglio,P. Ansaldi,S. 2008 Ontology Driven Certification of Pressure Process Safety Progress 27, 4 313 -322
8. Toro, C., Graña, M., Posada, J., Vaquero, J., Sanín, C., Szczerbicki, E. (2009) Domain modeling based on engineering standards Lecture Notes in Computer Science, 5711, pp. 95-102.

sessione POSTER

6
Caratterizzazione microstrutturale di acciai eserciti in impianti di steam reforming

A. Alvino - D. Lega* - A. Rinaldi**
*F. Giacobbe***
*D. Ramires****

**ISPESL Dipartimento Tecnologie di Sicurezza*
***ISPESL Dipartimento di Messina*
****ISPESL Dipartimento di Igiene del Lavoro*

SOMMARIO

Campioni di acciai refrattari eserciti per tempi compresi tra le 85.000-95.000 h in due impianti di steam reforming per la produzione di idrogeno sono stati analizzati al fine di individuare e localizzare le diverse forme di danneggiamento correlate alla tipologia di metallurgia ed alle particolari condizioni ambientali di esercizio.

L'impiego sinergico delle varie tecniche di analisi microscopica (LOM, SEM, AFM) ha consentito di delineare nei particolari l'evoluzione microstrutturale di questi materiali, ponendo in particolare evidenza fenomeni di precipitazione e trasformazione delle seconde fasi presenti.

Mediante analisi in diffrazione di raggi X, sia su campioni massivi che sul residuo insolubile estratto dopo dissoluzione della matrice, è stato possibile identificare tutte le seconde fasi presenti, tra le quali è stata identificata la G-phase, un intermetallico la cui formula è $Ni_{16}Nb_7Si_6$.

1. INTRODUZIONE

Nell'industria petrolchimica, tra i componenti d'impianto maggiormente soggetti a danneggiamento figurano i tubi catalitici degli impianti di cracking e reforming, in quanto le loro condizioni di esercizio sono generalmente drastiche, trattandosi di temperature superiori ad 800 °C e pressioni anche di 30-35 bar. La composizione chimica dei tubi risulta fondamentale nel conferire un'adeguata resistenza ai principali fenomeni di degrado che colpiscono questi componenti [1]: tra i materiali più utilizzati per la loro fabbricazione figurano gli acciai HP, oggetto di studio nella presente memoria, in cui è presente elevato tenore di nichel e cromo, oltre a piccole aggiunte di elementi carburigeni come niobio e titanio. Viste le elevate temperature a cui operano, i tubi catalitici sono particolarmente soggetti a creep, quasi sempre causato da locale surriscaldamento del componente [2,3]; lo sviluppo di materiali dalle prestazioni più elevate ha consentito un graduale innalzamento della temperatura massima d'esercizio, garantendo di pari passo una maggior efficienza dei processi ed una riduzione dei costi totali di produzione [4-6].

Negli acciai HP gli elevati tenori di Ni e Cr conferiscono le necessarie proprietà di resistenza alla corrosione, tenacità e stabilità della fase austenitica. L'elevato contenuto di carbonio rafforza la soluzione solida e promuove la formazione di una rete di carburi intergranulari ed intragranulari di struttura diversa in relazione agli elementi carburigeni presenti. L'insieme di questi precipitati migliora la resistenza alle alte temperature inibendo il movimento delle

dislocazioni e lo scorrimento dei bordi di grano.

Un'altra forma assai pericolosa di danneggiamento che può manifestarsi su questi componenti è la carburizzazione [7-11]: a temperature elevate ed in presenza di opportune miscele di reagenti collegate al processo, possono crearsi le condizioni adatte per la penetrazione del carbonio nella matrice metallica, ove tale elemento si combina con gli elementi di lega ed in particolare con il cromo. La formazione di carburi metallici impoverisce la matrice e la rende estremamente vulnerabile al danneggiamento da scorrimento viscoso e parimenti suscettibile ad attacchi corrosivi.

La prolungata attività in esercizio di questi componenti provoca una naturale evoluzione microstrutturale dei materiali che li compongono: negli acciai HP questo fenomeno si manifesta attraverso reazioni chimiche di precipitazione e trasformazione a carico delle seconde fasi presenti nella matrice.

L'evoluzione della struttura è già di per sé una forma di degrado perché comporta un graduale abbassamento delle caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale, rendendolo peraltro progressivamente più vulnerabile ai fenomeni di danneggiamento veri e propri che interessano questi componenti, come lo scorrimento viscoso a caldo e la carburizzazione. Studi mirati sull'evoluzione microstrutturale sono stati effettuati su campioni metallici invecchiati artificialmente (mediante riscaldamento prolungato in forno a temperature prossime a quelle di un reale esercizio) ed esaminati mediante analisi microscopica (solitamente ottica ed elettronica), chimica e diffrazione di raggi X, per ottenere una completa caratterizzazione della microstruttura dopo esercizio.

Pur essendo dei modelli semplificati, analisi di questo tipo hanno permesso di delineare con ragionevoli approssimazioni i vari fenomeni di invecchiamento e degrado microstrutturale a cui possono andare incontro questi acciai, ovvero la precipitazione di carburi secondari di cromo, l'ingrossamento delle seconde fasi preesistenti dovuto a ulteriore precipitazione di carburi metallici e la precipitazione di nuove fasi contenenti silicio, la cui struttura è oggetto di dibattito: alcuni autori identificano una G-phase (un composto intermetallico a base di nichel, niobio e silicio) a spese del carburo di niobio [12-17], mentre altri contraddicono questa assegnazione di struttura ritenendo si tratti di eta-phase [18].

2. CONFRONTO MATERIALI

Sono stati analizzati due tubi catalitici centrifugati provenienti da due differenti impianti di reforming, denominati F01 e F02. Il materiale è per entrambi una lega con un elevato tenore di nichel (35%) e di cromo (25%), la cui nomenclatura DIN è G-X 40 NiCrSiNb 35 25. Il tubo proveniente dal forno F02 presenta piccole aggiunte di titanio. La composizione chimica nominale di entrambe le leghe è riportata in tabella 1:

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Ti	Cu	Fe
F01	0.40	1.50	1.50	25.00	35.00	1.50	-	-	Bal.
F02	0.43	1.40	1.00	25.00	35.00	$\leq$ 1.50	$\leq$ 0.30	0.25	Bal.

Tabella 1 - Composizione chimica nominale dei materiali analizzati

Entrambi i tubi analizzati sono stati dismessi e sostituiti a scopo precauzionale in seguito ai risultati di controlli non distruttivi effettuati durante un periodo di fermo impianto, essendo state individuate cricche ed altre anomalie (in particolare deformazione geometrica ed ovalizzazione). Le caratteristiche di processo degli impianti e la loro influenza sulle forme di danneggiamento riscontrate sono oggetto di un'altra memoria presentata in questo convegno. Per effettuare un confronto il più possibile completo delle caratteristiche microstrutturali tra materiale esercito e materiale a tempo zero sono stati presi in esame campioni di materiale non esercito. Nel caso del tubo F01 si sono utilizzate le informazioni presenti in letteratura, mentre per il tubo F02 è stato possibile reperire ed analizzare campioni di materiale non esercito, provenienti da un tubo nuovo, denominato F0.

3. ANALISI MICROSCOPICA

3.1 Microscopia ottica

Sono stati prelevati campioni metallografici dagli spezzoni di tubo e sono state analizzate sia sezioni longitudinali che trasversali. L'esame microstrutturale è stato condotto utilizzando vari reattivi di etching, scelti tra quelli indicati dall'ASM per questa tipologia di materiali [19].

- Reattivo di Murakami: 10 g $K_3Fe(CN)6$, 10 g KOH, 100 ml H_2O.
- Reattivo di Groesbeck: 4 g $KMnO_4$, 4 g NaOH, 100 ml H_2O.
- Glyceregia: 3 parti HCl, 2 parti glicerolo, 1 parte HNO_3.

La microstruttura del materiale non esercito è costituita da una matrice austenitica in cui sono dispersi carburi eutettici (primari) in un pattern interdendritico ampiamente descritto in letteratura [12-15], consistente in una rete pressoché continua e ramificata. Nel caso del materiale del tubo F0 (figura 1) questa dispersione è meno continua, a causa della presenza di titanio tra gli elementi di lega, il quale forma carburi a struttura più fine. Non ci sono tracce di precipitazione di carburi secondari all'interno dei grani austenitici.

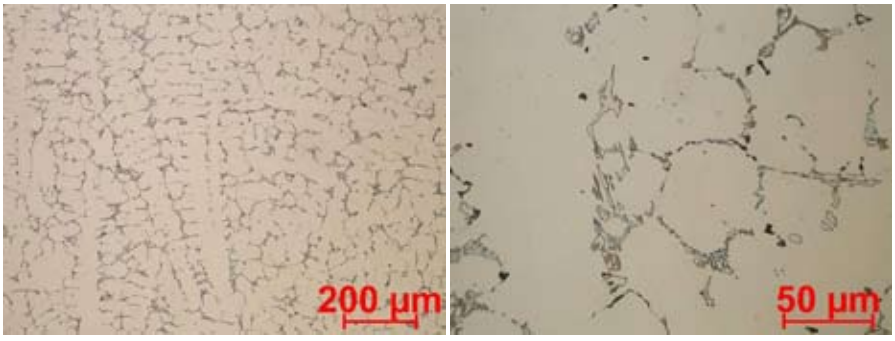


Figura 1 - Micrografie LOM a differenti ingrandimenti di campioni di materiale F0. Sezioni radiali.

I campioni provenienti da materiali eserciti mostrano inequivocabilmente segni d'invecchiamento dovuti alla prolungata attività in esercizio.

Il materiale del tubo F01 evidenzia infatti un sostanziale ingrossamento dei carburi eutettici, il cui aspetto ricorda ora molto una rete di grossolane placche spesso definita "scheletal pattern" [12] vista la decisa somiglianza con un'impalcatura ossea (figure 2a e 2b). Si registra inoltre la precipitazione, localmente massiccia, di carburi secondari all'interno della matrice austenitica. La superficie esterna appare sostanzialmente priva di precipitati (figura 2c). Analizzando una sezione radiale di tubo si nota che l'invecchiamento del materiale non è uniforme lungo tutta la sezione, ma tende a farsi più pronunciato man mano che ci si avvicina alla superficie interna, dove la precipitazione di seconde fasi si fa progressivamente più massiccia, fino a rendere quasi indistinguibile la matrice austenitica (figura 2d). In prossimità della superficie interna del tubo la microstruttura cambia ulteriormente e drasticamente: si osserva infatti una struttura porosa e fessurata che si estende per quasi 1 mm dalla superficie verso il bulk del materiale.

Il tubo F02 presenta anch'esso una microstruttura che risente del prolungato periodo di esercizio: ai carburi eutettici ingrossati e localmente saldati tra loro si accompagnano precipitati all'interno del grano austenitico identificabili come carburi secondari (figure 3a e 3b); l'aggregazione delle seconde fasi è comunque più discontinua e meno pronunciata rispetto al tubo F01. Analogamente a quanto osservato in F01, anche questo materiale presenta in corrispondenza della superficie interna (figure 3c e 3d) una microstruttura diversa da quella caratteristica del bulk: in questo caso, però, il materiale presenta uno strato superficiale compatto, spesso un centinaio di Qm, simile per aspetto alla fase austenitica, dalla quale comunque si differenzia in quanto privo della ragnatela di carburi che abitualmente accompagnano quest'ultima in questa tipologia di acciai.

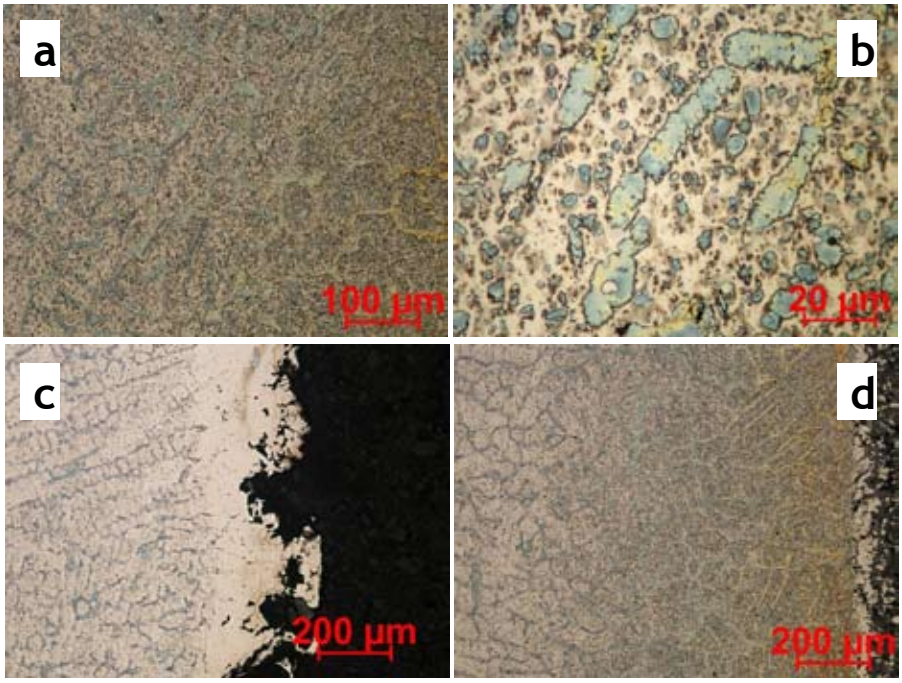


Figura 2 - Micrografie LOM a differenti ingrandimenti di campioni di materiale F01. a) bulk; b) ingrandimento di a; c) presso la superficie esterna; d) presso superficie interna. Sezioni radiali.

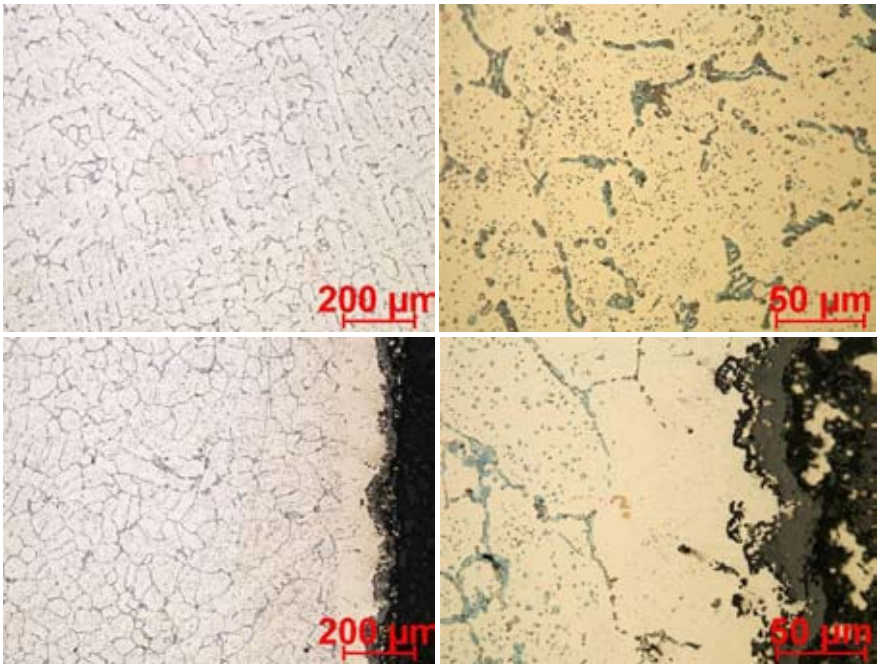


Figura 3 - Micrografie LOM a differenti ingrandimenti di campioni di materiale F02. a) bulk; b) ingrandimento di a; c) presso la superficie interna; d) ingrandimento di c. Sezioni radiali.

3.2 Microscopia elettronica

Le evidenze microstrutturali individuate dalla microscopia ottica sono state osservate in maniera decisamente più approfondita mediante microscopia elettronica, usando come rivelatore una sonda ad elettroni retrodiffusi (backscattered electrons, BSE).

Con questa tecnica sono state rilevate con precisione le varie fasi presenti nei materiali studiati, determinandone inoltre la composizione chimica mediante microsonda EDX. Cavità, microfessurazioni e altre forme di danneggiamento sono state altresì individuate nei campioni eserciti, arricchendo ulteriormente il patrimonio di informazioni strutturali a disposizione.

Il materiale del campione F0 (l'analogo non esercito del tubo F02) presenta la sua veste originaria, ovvero una matrice di austenite con una fine ragnatela di carburi eutettici (figura 4).

Da un'analisi EDX risulta che tale rete è in realtà composta da più fasi, chiaramente distinguibili in base alla colorazione osservabile. Le fasi scure sono carburi di cromo, del tipo M_7C_3 (con M = Cr) mentre quelle chiare sono carburi misti di niobio e titanio. Nel caso del tubo F01, il materiale non esercito avrebbe più o meno la stessa struttura di F0, con la differenza che le fasi chiare sarebbero costituite esclusivamente da carburi di niobio (la lega non contiene titanio) e il pattern reticolare delle seconde fasi apparirebbe leggermente più grossolano, come già accennato nella sezione dedicata alla microscopia ottica.

I carburi interdendritici decisamente ingrossati e la massiccia precipitazione di carburi secondari sono molto ben individuabili nelle micrografie SEM del tubo F01 (figure 5a-5c). Un aspetto particolarmente interessante messo in evidenza dall'analisi EDX è l'evoluzione strutturale del materiale: i carburi di niobio che erano massicciamente presenti nel materiale non esercito (fasi chiare) sono stati quasi del tutto convertiti in un composto intermetallico a base di nichel, niobio e silicio, il quale appare anch'esso chiaro quando osservato con sonda BSE (figura 5b). L'evoluzione microstrutturale ha interessato anche i carburi di cromo (fase scura), i quali si sono progressivamente arricchiti in nichel e ferro, evolvendo verso forme del tipo $M_{23}C_6$ (con M = Cr, Fe, Ni).

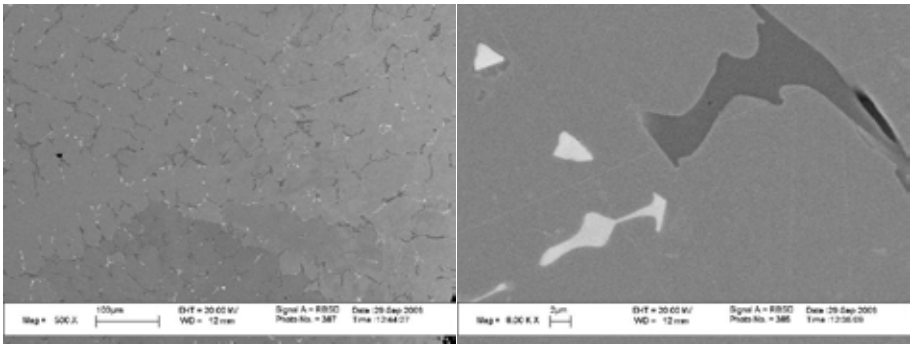


Figura 4 - Immagini SEM BSE a differenti ingrandimenti di campioni di materiale F0. Sezioni radiali.

Nel bulk sono presenti cavità sparse, localmente allineate unitamente a microcricche. Queste ultime sembrano propagarsi preferenzialmente lungo le direttrici radiali, seguendo la rete di carburi ed in particolare quelli in cui è presente cromo, mentre le fasi intermetalliche ed il rimanente carburo di niobio non ancora trasformatosi sembrano non essere affetti da fessurazioni o cavità (figura 5d). Il degrado strutturale diventa particolarmente pronunciato in corrispondenza della superficie interna: l'analisi EDX mostra infatti che nella porzione di materiale immediatamente adiacente ad essa la matrice austenitica è andata quasi totalmente perduta, essendo il cromo non più presente assieme a ferro e nichel, ma precipitato sotto forma di carburo. L'aspetto della microstruttura ricorda molto da vicino quello di campioni di tubi carburizzati descritti in letteratura [20], in cui la struttura reticolare dei carburi eutettici non è più riconoscibile a causa dell'avanzato processo di ingrossamento e coalescenza degli stessi

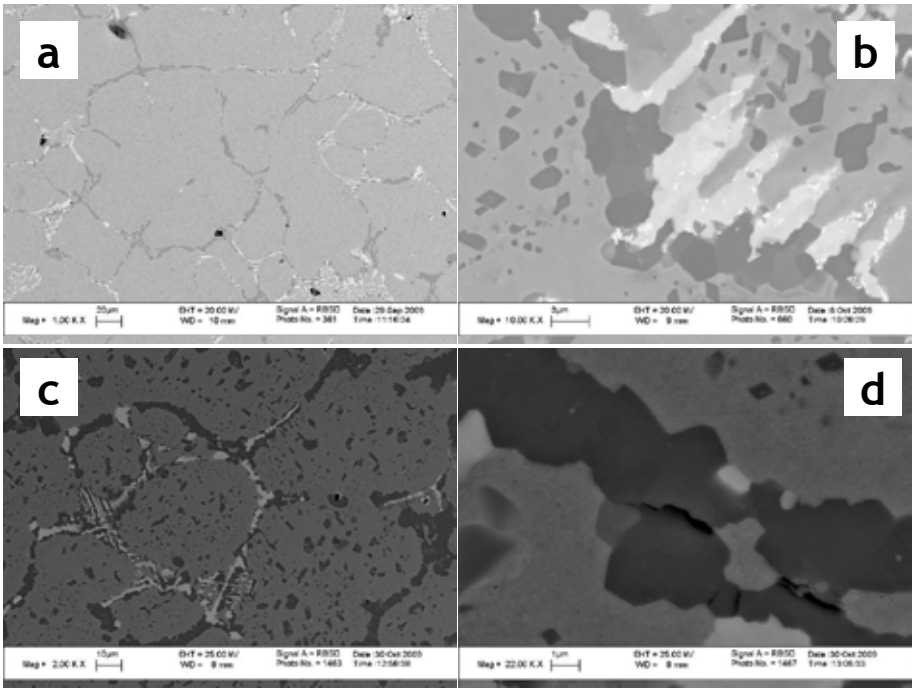


Figura 5 - Immagini SEM BSE di campioni provenienti dal tubo F01. a) bulk; b) ingrandimento di a; c) bulk con abbondanti precipitati e microcricche; d) particolare di c con microcricche. Sezioni radiali.

guidato dalla massiccia penetrazione del carbonio nella matrice (figura 6a). Cavità, microcricche e fessurazioni tipiche di questo fenomeno di danneggiamento sono estremamente diffuse. La propagazione delle cricche avviene principalmente lungo direttrici radiali, cui segue una graduale coalescenza anche in direzione circonferenziale che porta alla progressiva e continua corrosione ed erosione meccanica del metallo (figure 6b e 6c).

La superficie esterna si presenta invece ricca di grosse cavità identificabili probabilmente come porosità di Kirkendall, formatesi per il dissolvimento dei carburi di cromo a causa del surriscaldamento a cui il tubo è esposto in quella porzione (a diretto contatto con i bruciatori del forno), con formazione di uno strato di ossido. All'interno della matrice austenitica è perciò osservabile solo la fase intermetallica di nichel, niobio e silico (colore chiaro), mentre i carburi di cromo sono estremamente rari (figura 6d).

Per quanto riguarda il tubo F02, si nota una minore evoluzione microstrutturale evidenziata da un ingrossamento meno netto dei carburi primari e da una più lieve precipitazione di quelli secondari (figura 7a). Anche in questo caso l'entità del danneggiamento si fa più evidente, seppur di poco, avvicinandosi alla superficie interna del tubo (figura 7b), la quale, tuttavia, non mostra segni di particolare degrado dovuto a corrosione/carburizzazione come osservato precedentemente per il tubo F01. Una differenza sostanziale nella evoluzione strutturale del tubo F02 sta nel fatto che le misure EDX hanno evidenziato come la trasformazione del carburo di niobio nella fase intermetallica di nichel, niobio e silicio non sia quantitativa, come invece osservato nel tubo F01. Oltre alle fasi scure, compatibili con i carburi $M_{23}C_6$, sono infatti individuabili più fasi di colore chiaro, che la microanalisi ha svelato essere dei composti differenti: oltre allo stesso intermetallico, che è presente comunque in percentuali apprezzabili, sono infatti chiaramente osservabili anche il carburo di niobio e quello misto di niobio e titanio. Peraltro, in corrispondenza delle zone in cui è presente la fase intermetallica vi sono delle piccole aree di colore scuro in cui è stata riscontrata mediante microanalisi EDX una notevole percentuale di titanio, ad indicare che il processo di formazione della fase intermetallica tende a segregare questo elemento, separandolo dal niobio con cui era associato sotto forma di carburo misto.

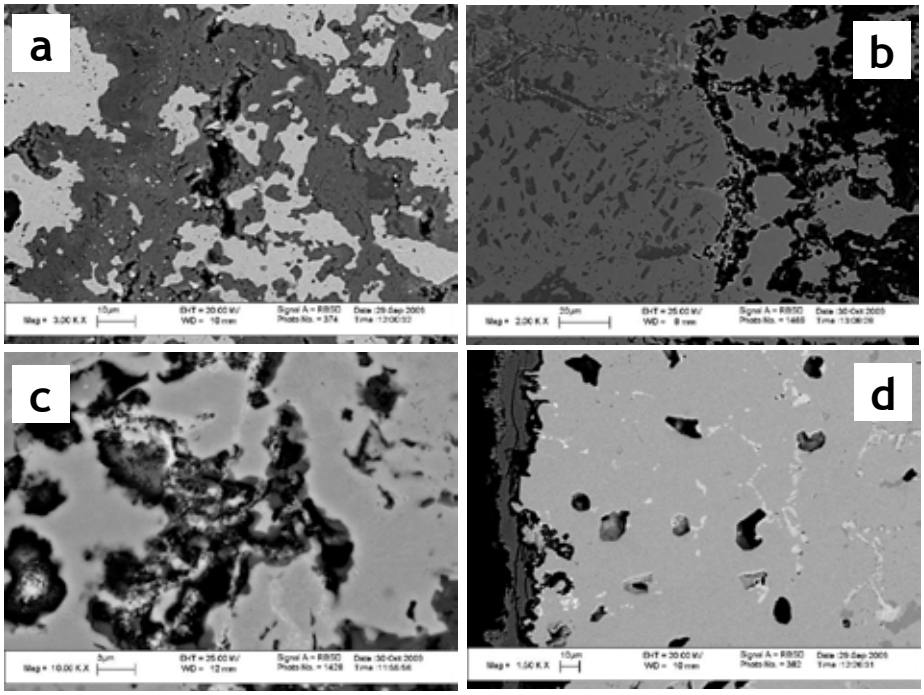


Figura 6 - Immagini SEM BSE di campioni provenienti dal tubo F01. a) zona carburizzata presso la superficie interna; b) zona di confine tra materiale carburizzato e non ; c) come b ma a maggior ingrandimento; d) particolare della superficie esterna.

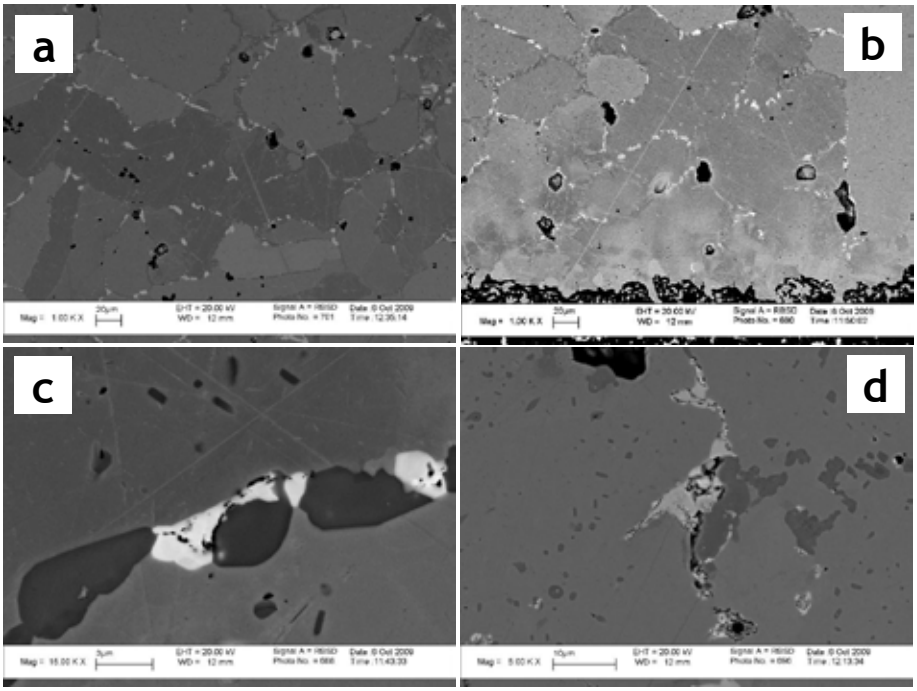


Figura 7 - Immagini SEM BSE di campioni provenienti dal tubo F02. a) bulk; b) superficie interna ; c)e d) particolari su precipitati e cricche.

Un gran numero di cavità sparse e localmente allineate, lungo buona parte della sezione del tubo, sono state osservate, con densità maggiore presso la superficie interna (figure 7a e 7b). Microcricche si dipartono in direzione radiale, privilegiando come fase di propagazione i precipitati di niobio e titanio (figure 7c e 7d), a differenza di quanto osservato in F01, dove erano i carburi di cromo ad esserne principalmente affetti.

3.3. Microscopia a forza atomica

Un'ulteriore approfondimento sulla natura del danno e sull'evoluzione microstrutturale dei materiali analizzati è emerso dall'analisi in AFM di alcuni campioni ricavati dai tubi eserciti. I risultati hanno sostanzialmente confermato quanto precedentemente osservato al LOM e soprattutto al SEM: presenza diffusa di cavità e di microcricche in entrambi i campioni di tubi eserciti, col tubo F01 che presenta una evidente area carburizzata.

L'analisi AFM ha fornito soprattutto un robusto supporto alle ipotesi sui meccanismi di danneggiamento di questi materiali, formulate sulla base delle evidenze fornite dalla microscopia elettronica, poiché ha evidenziato su scala del micron come l'innesco delle microcricche avvenga generalmente in corrispondenza dei carburi o comunque delle seconde fasi in genere. La peculiarità dell'AFM ha inoltre permesso di elaborare dei profili tridimensionali dei campioni esaminati, mostrando zone con profonde discontinuità e fessurazioni (figura 8).

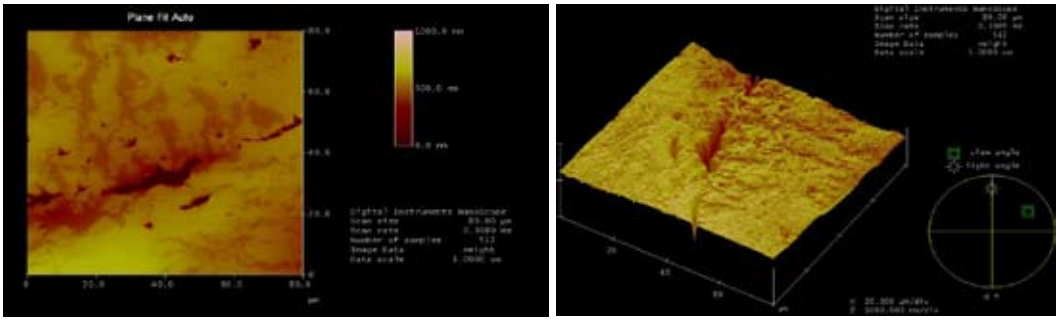


Figura 8 - Campioni provenienti dal tubo F01 esaminati in AFM.

4. ANALISI IN DIFFRAZIONE.

L'analisi in diffrazione di raggi X (DRX) dei materiali a disposizione è stata condotta seguendo due differenti approcci: in prima battuta sono stati preparati ed analizzati campioni massivi di materiale; successivamente si è proceduto all'analisi delle sole seconde fasi, previa dissoluzione chimica della matrice secondo un protocollo presente in letteratura [21].

I diffrattogrammi di campioni massivi del tubo F0 mostrano chiaramente la presenza dei segnali tipici dell'austenite (la cui assegnazione è stata effettuata avvalendosi del software dello strumento), mentre non vi è traccia di picchi relativi ad altre fasi. Ciò è perfettamente spiegabile in quanto la soglia di sensibilità di questa tecnica è circa dell'8% in volume, pertanto le seconde fasi, che solitamente sono poco abbondanti, non vengono generalmente messe in evidenza sul massivo.

Pattern molto semplici e con una netta evidenza dei segnali austenitici sono stati ottenuti anche per i campioni dei tubi eserciti; nel caso del tubo F01 comunque, c'è da mettere in evidenza la presenza di deboli picchi che il software di assegnazione ha identificato come tipici dei carburi $M_{23}C_6$. Evidentemente in questo materiale la precipitazione di seconde fasi è stata così massiccia da superare perfino la soglia di individuazione dello strumento, fornendo un'ulteriore conferma dell'avanzata evoluzione strutturale da esso subita.

Risultati ancora più interessanti sono stati ottenuti esaminando le polveri ottenute come residuo insolubile (refrattario) dopo dissoluzione chimica dei materiali di partenza, eliminando così la matrice: questo secondo metodo ha permesso infatti di osservare le seconde fasi che nei campioni massivi erano pressocchè invisibili.

In accordo con quanto presente in letteratura riguardo a questo tipo di materiale, allo stato non esercito [15] i campioni di tubo F0 (analogo non esercito di F02) mostrano segnali relativi a carburi del tipo M_7C_3 (con M = Cr) e a dei carburi misti di niobio e titanio (figura 9). La letteratura fornisce inoltre dati molto simili anche per l'altro materiale non esercito [15], ovvero quello di cui è costituito F01, con la sola differenza che invece dei carburi misti (Nb, Ti)C sono presenti i segnali dei carburi di solo niobio, NbC.

I materiali esercitati mostrano invece spettri più complessi (figure 10 e 11), in ragione di un maggior numero di segnali presenti.

L'evoluzione microstrutturale appare evidentissima dall'analisi di tali spettri, poiché si riscontrano delle differenze nettissime tra materiale esercito e non. Peraltro le quantità di polveri ottenute dopo la dissoluzione della matrice sono maggiori rispetta a quanto trovato per il materiale a tempo zero, fornendo ulteriori indicazioni di una evidente evoluzione strutturale, più accentuata nel tubo F01.

Campioni di tubo F01 mostrano picchi molto intensi (figura 10) che sono stati assegnati ai carburi $M_{23}C_6$, (in cui M = Cr, Fe, Ni) mentre non v'è traccia dei segnali relativi a quelli di formula M_7C_3, osservati in campioni non esercitati.

Sono identificabili anche i segnali tipici del carburo di niobio, che comunque appaiono piuttosto deboli, segno che questa fase, presente in apprezzabile concentrazione nel materiale a tempo zero, ha subito un qualche processo di trasformazione. Tenendo presente da un lato i dati presenti in letteratura per materiali invecchiati artificialmente e dall'altro i risultati delle analisi EDX illustrati nel precedente paragrafo è stata proposta l'ipotesi che il composto intermetallico in cui si è trasformato quasi integralmente il carburo di niobio sia la G-phase la cui esatta stechiometria risulta essere $Ni_{16}Nb_7Si_6$ [22]. La conferma dell'esattezza di tale supposizione è stata ottenuta proprio dall'identificazione di una serie di picchi presenti nel pattern DRX, i quali coincidono appieno con quelli assegnati alla G-phase da altri autori [14].

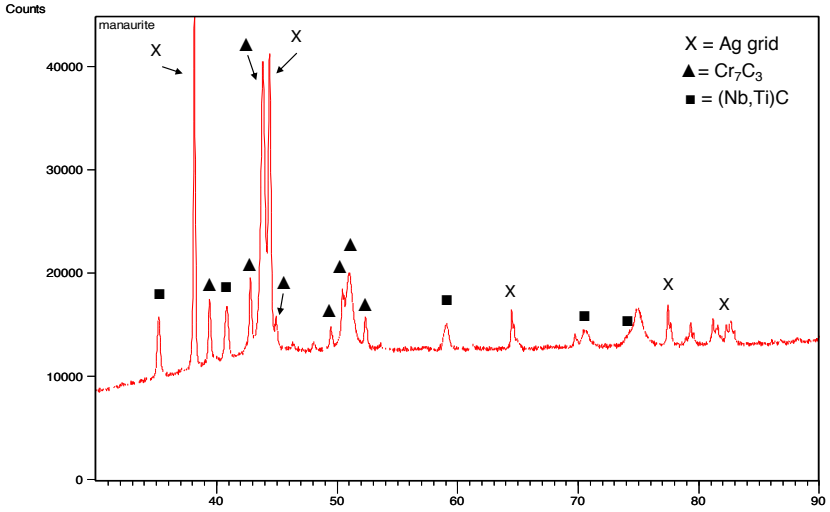


Figura 9 - Pattern DRX delle seconde fasi di F0 ottenute sotto forma di polveri mediante dissoluzione della matrice ed estrazione del residuo insolubile.

Lo spettro ottenuto dalle polveri estratte dal tubo F02 (figura 11) presenta un aspetto simile a quello di F01, ma ci sono alcuni particolari che sostanzialmente ne marcano la differenza: oltre a quelli del carburo di niobio è possibile individuare anche i segnali dei carburi misti di niobio e titanio, essendo presente in questo materiale una piccola percentuale di quest'ultimo

elemento. Questi picchi inoltre sono più intensi di quelli osservati in F01, segno di una presenza più cospicua nel materiale, che si accompagna ad una minore presenza di G-phase, come pure si deduce dalla minore intensità dei segnali tipici di questa fase. Pertanto, sulla base di questi risultati è ragionevole pensare che in F02 la conversione in G-phase dei carburi sia stata meno massiccia di quanto osservato in F01, come anche i risultati delle analisi EDX (paragrafo 3) hanno mostrato.

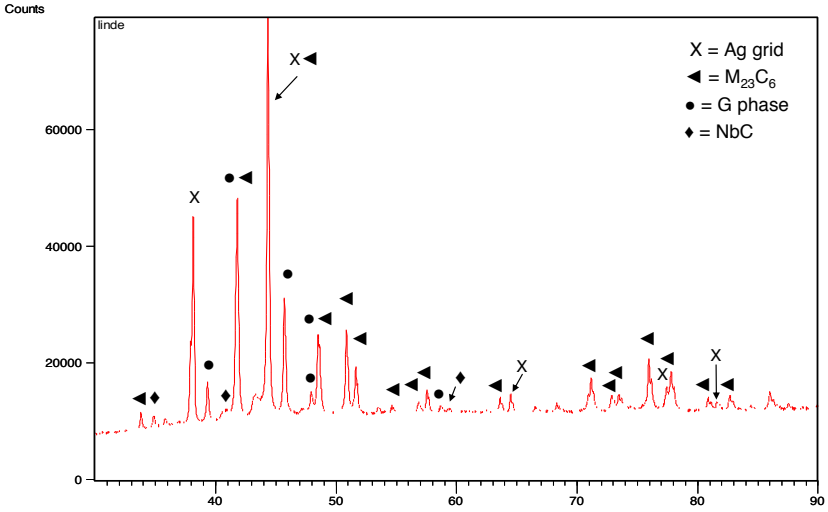


Figura 10 - Pattern DRX delle seconde fasi di F01 ottenute sotto forma di polveri mediante dissoluzione della matrice ed estrazione del residuo insolubile.

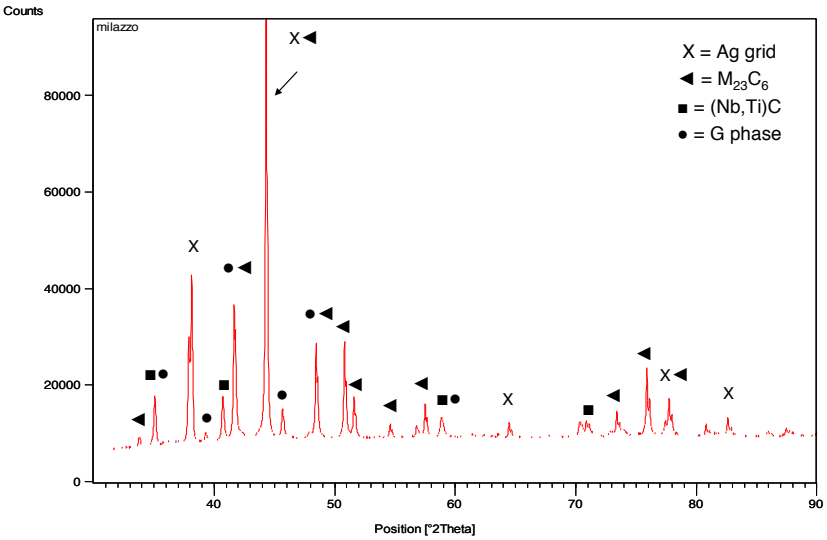


Figura 11- Pattern DRX delle seconde fasi di F02 ottenute sotto forma di polveri mediante dissoluzione della matrice ed estrazione del residuo insolubile.

5. CONCLUSIONI

Mediante l'aiuto delle numerose tecniche d'indagine illustrate nei precedenti paragrafi è stato possibile operare una caratterizzazione completa dei materiali eserciti analizzati. Ciascun metodo analitico ha fornito informazioni che sinergicamente hanno contribuito a delineare struttura, composizione chimica ed evoluzione delle fasi presenti nei materiali, unitamente ai vari meccanismi di danno che hanno afflitto questi componenti.

E' stato riscontrato un generale invecchiamento, che in termini di evoluzione strutturale ha comportato la coalescenza e l'ingrossamento della rete di carburi eutettici, i quali si sono progressivamente arricchiti di altri elementi di lega oltre al cromo, passando da stechiometria M_7C_3 tipica di un "as cast" (con M = Cr) a quella tipica di un acciaio esercito, ossia $M_{23}C_6$ (in cui M = Cr, Ni, Fe). Un chiaro indice di invecchiamento è da considerarsi anche la precipitazione di carburi secondari di cromo, localmente in forma massiva, come pure la formazione della G-phase, la cui presenza viene qui descritta per la prima volta in un acciaio HP realmente esercito in impianto. In accordo con quanto già riportato in letteratura [12], si può affermare che la presenza del titanio tra gli elementi di lega inibisce o quantomeno rallenta la formazione della G-phase, come dimostrato dai campioni prelevati dal tubo F02, nei quali la conversione del carburo di niobio non appare quantitativa, come invece risulta nel materiale proveniente da F01. Il degrado strutturale si è manifestato in maniera assolutamente più massiccia nel caso del tubo F01, il quale presenta oltretutto chiari segni di carburizzazione lungo la superficie interna a contatto col fluido di processo. Ad ogni modo entrambi i tubi mostrano chiaramente i segni del lungo periodo d'esercizio e le numerose cavità e microcricche individuate su di essi (in particolare su F02) in corrispondenza delle seconde fasi precipitate sono inequivocabile prova di un evidente danneggiamento da scorrimento viscoso a caldo. Un ulteriore elemento di differenziazione emerso dall'analisi strutturale dei materiali esaminati può essere individuato nel pattern di formazione delle microcricche: mentre in F01 esse si originano in corrispondenza dei precipitati di cromo e comunque non in presenza di fasi contenenti niobio (carburo di Nb o G-phase), nel tubo F02 sono proprio queste ultime a fare da innesco, lasciando ipotizzare che la presenza di titanio nella lega di F02, rende i precipitati di niobio in essa presenti suscettibili alla nucleazione di cricche.

6. RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare la Raffineria di Milazzo e la Linde Gas Italia (impianto di Milazzo) per aver fornito i campioni oggetto del presente studio, il signor Antonio Di Loreto per il supporto nelle preparazioni dei campioni metallografici e la professoressa Silvia Licoccia del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma Tor Vergata per aver cortesemente messo a disposizione degli autori il microscopio a scansione elettronica.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Schillmoller, C.M. "Solving high temperature problems in oil refineries and petrochemical plants" *Chemical Engineering*, 1986 vol. 93. p 83-87.
2. Schillmoller, C.M; Van Der Bruck, U.W. "Furnace alloys update" *Hydrocarbon Proc.* 1984 vol. 63 p. 55-59.
3. Swaminathan, J.; Guguloth, K.; Gunjan, M.; Roy, P.; Ghosh, R. "Failure analysisand remaining life assessment of service exposed primary reformer heater tubes" *Eng. Fail. Anal*. 2008; vol. 15 p. 311-331.
4. Parks, S.B.; Schillmoller, C.M "Use alloys to improve ethylene production" *Hydrocarbon Proc.* 1996 vol.75 p. 53-60.
5. Jaske, C.E.; Simonen, F.A.; Roach, D.B. "Predict reformer furnace tube life"*. Hydrocarbon Proc.* 1983 vol. 62 p. 63-68.
6. Hendrix, D.E. "Cast tube alloy performance in an ethylene pyrolisis test heater" *Mater. Perform.* 1999 vol. 38 p 66-71.

7. Grabke, H.J.; Wolf , I. “Carburization and oxidation” *Mater. Sci. Eng.* 1987 vol. 87 p.23-33.
8. Schnaas, A.; Grabke H.J. “High-temperature corrosion and creep of Ni-Cr-Fe alloys in carburizing and oxidizing environments” *Oxid. Met.* 1978 vol. 12 p. 387-404.
9. Nishiyama, Y.; Otsuka, N.; Nishizawa, T. “Carburization resistance of austenitic alloys in CH_4-CO_2-H_2 gas mixtures at elevated temperatures” *Corrosion* 2003 vol. 59 p.688-700.
10. Mitchell, D.R.G.; Young, D.J. “The effect of molybdenum and aluminium additions on the carburization behaviour of high temperature steel” *J. Mater. Sci. Lett.* 1993 vol. 12 p. 1076–1079.
11. Mitchell, D.R.G.; Young D.J. “A kinetic and morphological study of the coking of some heat-resistant steels” *J. Mater. Sci.* 1994 vol. 29 p. 4357–4370.
12. De Almeida, L.H.; Ribeiro, A.F.; Le May, I. “Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes” *Mater. Charact.* 2003 vol. 49 p. 219-229.
13. Barbabela, G.D.; De Almeida, L.H.; Da Silveira, T.L.; Le May, I. “Role of Nb in modifying the microstructure of heat-resistant cast HP steel” *Mater. char.* 1991; vol. 26 p. 193-197.
14. De Almeida Soares, G.D.; De Almeida, L.H.; Da Silveira, T.L.; Le May, I. “Niobium addition in HP heat resistant cast stainless steels” *Mater. Charact.* 1992 vol. 29 p. 387-396.
15. Ibañez, R.A.P.; De Almeida Soares, G.D.; De Almeida, L.H.; Le May, I. “Effects of Si content on the microstructure of modified-HP austenitic steels” *Mater. Charact.* 1993 vol. 30 p. 243-249.
16. . Voicu, R.; Andrieu, E.; Poquillon, D.; Furtado, J. ; Lacaze, J. “Microstructure evolution of HP40-Nb alloys during aging under air at 1000 °C” *Mater. Charact.* 2009 vol. 60 p. 1020-1027.
17. Ribeiro, A.F.; Tavares Borges, R.M.; De Almeida, L.H. “Phase transformation in heat resistant steels observed by Stem. (NbTi)C – NiNbSi (G-Phase)” *Acta Microscopica* 2002 vol. 11 p. 59-63.
18. Kenik, E.A.; Maziasz, P.J.; Swindeman, R.W.; Cervenka, J.; May, D. “Structure and phase stability in a cast modified-HP austenite after long-term ageing” *Scripta Materialia* 2003 vol. 49 p. 117-122.
19. ASTM E 407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.
20. Da Silva, I.C.; Da Silva, R.S.; Rebello, J.M.A.; Bruno, A.C.; Silveira, T.F.; “Characterization of carburization of HP steels by non destructive magnetic testing” *NDT&E International* 2006 vol. 39 p. 569-577.
21. Burke, K.E. “Chemical extraction of refractory inclusions from iron- and nickel-base alloys” *Metallography* 1975 vol. 8, p. 473-488.
22. Spiegel, F.X.; Bardos, D.; Beck, P.A. “Ternary G and E silicides and geramides of transition elements” Trans. Met. Soc. AIME 1963 vol. 27 p. 575-579.

sessione POSTER

7
Confronto esito valutazioni sullo scorrimento viscoso di tubazioni in A335 P22 con oltre 200.000 ore di esercizio

*F. Giacobbe**
*V. Mancuso** - A. Branca***
*M. Lanzani****
*C. Sampietri*****

* *ISPESL dip. Messina,*
** *EDIPOWER CTE S.Filippo del Mela*
*** *EDIPOWER OP/MAN,*
**** *CSA-Exova*

1. SOMMARIO

Il presente documento riporta le esperienze Edipower circa la valutazione di vita residua e la sintesi dei controlli non distruttivi e delle analisi metallografiche effettuati ai sensi dell'art. 16 del 329/04 sulle linee del Vapore Principale e del Vapore Risurriscaldato Caldo dei sei gruppi (di cui n°4 da 160 MW e n°2 da 320 MW) della centrale termoelettrica di San Filippo del Mela (ME) al fine di valutarne lo stato di conservazione ed efficienza. Essendo le tubazioni realizzate in acciaio A335 P22, la cui temperatura di soglia per lo scorrimento viscoso è pari a 454 °C, ed essendo la temperatura di esercizio, in condizioni di regime, pari a 540 °C risulta significativa la valutazione del degrado per creep tenendo conto anche delle reali ore di esercizio (comprese tra 202.000 e 250.000 ore) e dei limitati dati a carattere storico. Per la valutazione dello stato di conservazione delle suddette attrezzature è stato quindi redatto un apposito piano di controlli basato sulle possibili forme di degrado. Il piano dei controlli ha focalizzato l'attenzione in prossimità delle giunzioni saldate, delle curve a raggio più stretto, dei supporti e lungo i tratti rettilinei.

L'esito finale dei controlli ha evidenziato una generale assenza di difetti ed un classe di degrado, secondo la classificazione di Neubauer, pari a 1. Sporadicamente si sono evidenziati casi con classe (o grado) 1/2 e 2, in particolar modo nei circuiti VP. In conclusione i risultati delle indagini effettuate hanno evidenziano un grado di danno estremamente contenuto in considerazione del lungo periodo di esercizio, tale affermazione è supportata anche dalle verifiche di calcolo riguardanti la valutazione della frazione di vita spesa che è risultata dell'ordine del 20-30% in funzione delle varie linee e delle varie unità considerate.

2. MECCANISMI DI DANNEGGIAMENTO E TECNICHE DI CONTROLLO

I motivi di degrado del materiale durante il funzionamento sono essenzialmente di tipo metallurgico, meccanico e chimico e dipendono dal tipo di esercizio e dall'ambiente in cui opera l'impianto e/o il componente.

Gli studi e le applicazioni su vita utile e vita residua sono rivolti ad analizzare i diversi tipi di degrado, sempre utilizzando i CND, per verificare l'insorgere lo stato effettivo dei fenomeni.

La scelta delle tecniche di indagine è essenziale per questi studi, ma lo è anche la pianificazione dei controlli, che comprende l'individuazione dei componenti e/o delle zone critiche, la tempistica, le modalità ed i criteri di accettazione.

3. CENNI SULLO SCORRIMENTO VISCOSO

Per i componenti installati in impianti per la produzione di energia elettrica, lo scorrimento viscoso (noto anche come "creep") rappresenta uno dei principali meccanismi di danneggiamento. Esso é un fenomeno di degrado delle caratteristiche meccaniche che riveste particolare importanza in sede di progettazione ed esercizio di attrezzature a pressioni operanti ad alte temperature. Si manifesta come la lenta deformazione di un materiale sotto sforzo risultante in un cambiamento permanente della forma determinato dal movimento delle dislocazioni o da fenomeni di diffusione nelle matrici metalliche. Si manifesta in condizioni di esercizio superiori alla cosiddetta temperatura di scorrimento (Ts) pari circa a 0,3-0,4 la temperatura di fusione del materiale. Oltre alla temperatura anche il valore dello sforzo influisce sull'andamento del creep in particolare sulla velocità di deformazione e ovviamente sul tempo a rottura.

I motivi di degrado del materiale durante il funzionamento sono essenzialmente di tipo metallurgico, meccanico e chimico e dipendono dal tipo di esercizio e dall'ambiente in cui opera l'impianto e/o il componente.

Gli studi e le applicazioni su vita utile e vita residua sono rivolti ad analizzare i diversi tipi di degrado, sempre utilizzando i CND, per verificare l'insorgere lo stato effettivo dei fenomeni.

La scelta delle tecniche di indagine è essenziale per questi studi, ma lo è anche la pianificazione dei controlli, che comprende l'individuazione dei componenti e/o delle zone critiche, la tempistica, le modalità ed i criteri di accettazione.

Le attrezzature a pressione, quali i generatori di vapore, che operano ad alte temperature sono progettati per una certa "vita utile", dopo la quale ci sono delle disposizioni (circolare ISPESL 48/03[1]) che fissano controlli e calcoli per stabilire la "vita residua".

Per la valutazione dello stato di degrado sono utilizzati i seguenti controlli:

- Esame visivo (VT) e controllo dimensionale;
- Controllo magnetoscopico (MT) o con liquidi penetranti (PT);
- Esame con ultrasuoni (UT), difettoscopico, per il controllo delle saldature;
- Esame microstrutturale con replica metallografica.

In particolare l'esame con replica metallografica cavitazionale è di fondamentale importanza per la valutazione del degrado del materiale (formazione di micro vuoti a bordo grano); questa metodologia è stata studiata e sviluppata negli anni 1970/1980 e permette la valutazione del danneggiamento secondo la classificazione di Neubauer. Il principio si basa sul fatto che l'evoluzione da creep di acciai resistenti ad alta temperatura è legata alla comparsa di cavità (danneggiamento di classe/grado 2) e alla loro evoluzione prima della rottura. Queste cavità successivamente si allineano (danneggiamento di classe/grado 3) e gradualmente, tramite coalescenza, formano microcricche (danneggiamento in classe/grado 4 e 5) che portano ad avviare la rottura.

4. DENUNCIA AI SENSI DELL'ART 16 DEL D.M. N° 329/2004

Tra le novità introdotte dal D.M. n° 329/04 sono particolarmente significativi ed innovativi gli adempimenti previsti dall'art. 16.

Infatti per la prima volta i recipienti per liquidi e le tubazioni, realizzate prima dell'entrata in vigore della PED, devono essere denunciate all'ISPESL, competente territorialmente, con il seguente corredo documentale:

a) descrizione sintetica dell'attrezzatura
b) classificazione secondo le categorie previste dalla PED
c) valutazione sullo stato di conservazione ed efficienza dell'attrezzatura





Figura 1 – Foto di tratti di tubazione (linee VP e VRC) oggetto di denuncia ai sensi dell'art. 16 el D.M. 329/04

Per poter ottemperare a quanto indicato dall'art.16 l'Utilizzatore ha definito appositi piani di controllo, coerentemente alla norma UNI/TS 11325-1[2], necessari per poter dichiarare il buon stato di conservazione ed efficienza. Tali piani sono correlati ai principali meccanismi riscontrabili su tubazioni inserite in impianti termoelettrici.

- Creep - si può manifestare sulle tubazioni del vapore principale, vapore surriscaldato caldo, spillamenti, in ogni caso è funzione del tipo di materiale e delle temperature di progetto/esercizio;
- Corrosione delle superfici esterne - tipicamente sottocoibente, può interessare tutte le tubazioni quando sono rilevabili danneggiamenti della coibentazione;
- Erosione/corrosione delle superfici interne – ipotizzabili su tubazioni dove pressione, velocità e geometrie possono indurre usura; o su tubazioni per fluidi contenenti impurità corrosive;
- Fatica termo meccanica - tubazioni vapore, spillamenti ed acqua alimento;
- Sovrasollecitazioni lungo le tubazioni indotte da eventuali dilatazioni termiche impedite o da interferenze con elementi di impianto al contorno – potrebbero essere interessate tutte le tubazioni soggette a cicli termici

Il documento "piano delle prove non distruttive" raccoglie tutte le informazioni, definisce le attività in merito alle posizioni, l'estensione ed il tipo di prova.

Per gruppi omogenei di tubazioni sono stati previsti controlli mirati tali da consentire il monitoraggio dello stato di conservazione del materiale/componente.

5 . DANNEGGIAMENTO DA CREEP

Nel presente lavoro si esaminano in particolare gli esiti dei controlli eseguiti per la valutazione del danno da creep presso la centrale termoelettrica Edipower di San Filippo del Mela (ME) [3].

Per valutare lo stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni si sono previsti i seguenti controlli estesi alle posizioni significative (esempio punti fissi, ancoraggi, curve inserite in tratti ad omega soggetti a sensibili deformazioni) individuate lungo la tubazione:

- Esame magnetoscopico (MT);
- Durezze con metodi non distruttivi ed apparecchi portatili (HT);
- Repliche metallografiche (RM).

Per quanto riguarda gli esami magnetoscopici sono stati preferenzialmente effettuati in prossimità delle curve, saldature e pezzi speciali. Repliche e durezze su saldature, eventualmente su curve con raggio stretto.



Figura 2 – Replica metallografica

A titolo di esempio di seguito viene riportato il piano relativo alla tubazione del vapore principale soggetta a meccanismo di danneggiamento del tipo creep e fatica termo meccanica.

Particolare Meccanico	Controllo Non Distruttivo	
SALDATURA	VT	RM
	MT/LP	US
	TH	
TRATTO DIRITTO	VT	TH
CURVA	VT	RM
	MT/LP	US
	TH	

Tabella 1 – Tipologia e localizzazione delle PND per la tubazione del vapore principale

Le tubazioni dei circuiti VP (Vapore Principale) e VRC (Vapore Risurriscaldato Caldo) sono in ASTM A335 P22 (vedi tabella 2).

Caratteristiche meccaniche									
Standard	**Grado**	**$\sigma_{snervamento}$ [MPA]**		**$\sigma_{rottura}$ [MPa]**		**Allungamento %**		**Temperatura creep [°C]**	
ASTM A335	*P22*	*207*		*413*		*22*		*454*	
Composizione chimica									
		C	**Mn**	**P_{max}**	**S_{min}**	**Si_{max}**	**Cr**	**Mo_{max}**	**Ni_{max}**
ASTM A335	*P22*	*0,05 0,15*	*0,3 0,6*	*0,025*	*0,025*	*0,5*	*1,9 2,6*	*0,87 1,13*	-

Tabella 2 – Caratteristiche meccaniche e composizione chimica del materiale ASTM A335 P22

L'attività di controllo RM ha evidenziato difetti da scorrimento viscoso compresi tra le classi/grado 1 e 2 (vedi tabella 3 e 4). Si è riscontrato un solo caso in classe/grado 2/3 in ZF di un giunto del gruppo SF6.

	ID saldature curve	MB_1	ZTA_1	ZF	ZTA_2	MB_2	% vita spesa	note
SF1	B5	1	1	1	1	1	24,1	Ramo sx
	CV1	1					24,1	Ramo sx
	B6	1	1/2	1/2	1/2	1	24,1	Ramo dx
SF2	B5	1	2	2	2	1	24	Ramo sx
	CV1	1					24	Ramo sx
	B6	1	1	1/2	1	1	24	Ramo dx
SF3	CV1	1					23,2	Ramo sx (2003)
	W8	1	1	1/2	1	1	23,2	Ramo dx
	CV2	1					23,2	Ramo dx (2003)
SF4	B16	1	1	1	1	1	23,1	Ramo sx (2003)
	B26	1	1	1	1	1	23,1	Ramo sx (2003)
	B9	1	1/2	1/2	1	1	23,1	Ramo sx
	CV2	1					23,1	Ramo dx (2003)
SF5	SA20	1	1	1	1	1	19,5	Ramo sx
	SA100	1	1/2	1/2	1/2	1	19,5	Ramo sx
	SA10	1	1/2	1/2	1/2	1	19,5	Ramo dx
	SA110	1	1/2	1/2	1/2	1	19,5	Ramo dx
SF6	SA10	1	1	1/2	1	1	18,8	Ramo sx
	SA100	1	1/2	2	1/2	1	18,8	Ramo sx
	SA20	1	1	1	1	1	18,8	Ramo sx
	SA110	1	1/2	1/2	1/2	1	18,8	Ramo sx

Tabella 3 – Esito delle Repliche Metallografiche sul circuito vapore principale VRC (Vapore Risurriscaldato Caldo)

	ID saldature curve	MB_1	ZTA_1	ZF	ZTA_2	MB_2	% vita spesa	note
SF1	B9	1	1	1/2	1/2	1	29,3	Ramo sx
	CV1	1					29,3	Ramo sx
	B10	1	1	1/2	1/2	1	29,3	Ramo dx
SF2	B9	1	1	1	1	1	29,3	Ramo sx
	CV1	1					29,3	Ramo sx
SF3	B9	1	1	1	1	1	28,2	Ramo sx (2003)
	W11	1	1	1	1/2	1	28,2	Ramo sx
	CV1	1					28,2	Ramo sx (2003)
	CV2	1					28,2	Ramo sx
	CV2	1					28,2	Ramo dx (2003)
SF4	B9	1	1	1	1	1	28,1	Ramo sx (2003)
	W28	1	1	1/2	1	1	28,1	Ramo dx
	CV1	1					28,1	Ramo sx (2003)
	CV2	1					28,1	Ramo dx
SF5	SA10	1	1	1	1	1	20	Ramo sx
	SA140	1	1	1	1	1	20	Ramo sx
	SA20	1	1/2	1/2	1/2	1	20	Ramo dx
	SA150	1	1/2	1/2	2	1	20	Ramo dx
	CV8	1					38,7 (*)	Bilanciam.
SF6	SA10	1	1/2	2/3	1/2	1	23,8	Ramo sx
	SA140	1	1/2	1/2	1/2	1	23,8	Ramo sx
	SA180	1/2	2	2	2	1	23,8	Ramo sx
	SA20	1	1/2	1/2	1	1	23,8	Ramo dx
	SA150	1	1/2	1	1/2	1	23,8	Ramo dx
	CV6	1					18,8	Bilanciam.
	SA120	1	2	1/2	1	1	18,8	Bilanciam.

(*) Nel tratto esaminato, sul valore della vita spesa, ha pesato una riduzione dello spessore imputabile al processo di fabbricazione

Tabella 4 – Esito delle Repliche Metallografiche sul circuito VP (Vapore Principale)

Eseguendo semplici elaborazioni statistiche con i dati riepilogati nelle tabelle 3 e 4 è possibile fare alcune considerazioni circa la distribuzione in percentuale dei livelli di danneggiamento in funzione della tipologiadi materiale (MB, ZTA e ZF).

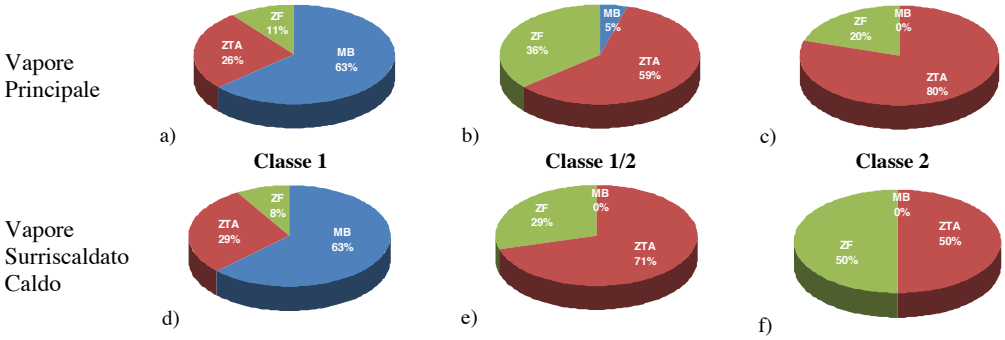


Figura 3 – Andamento della percentuale dei livelli di danneggiamento suddivisi per zona del giunto di saldatura.

La suddivisione in percentuale della classe 1 nelle tre zone del giunto si mantiene molto simile sia per la tubazione VP che VRC. I difetti classificati i classe 1/2 e 2 si presentano nella ZTA con una percentuale compresa tra il 50% e 80%.

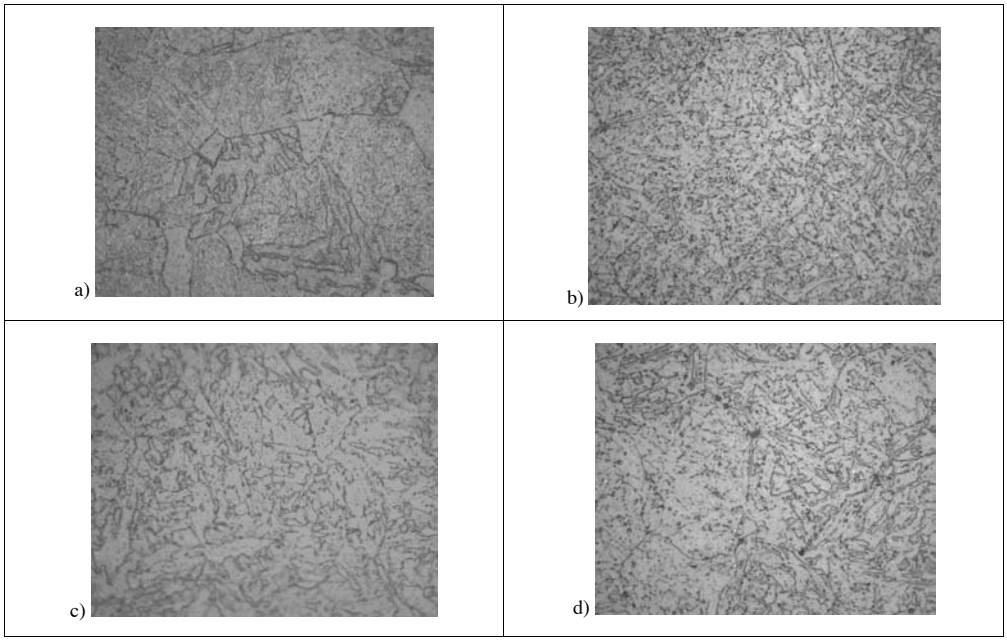


Figura 4 – Replica Metallografica.
caso a) classe 1 MB; caso b) classe 1/2 ZTA; caso c) classe 1/2 ZF; caso d) classe 2/3 ZF;

6. CONCLUSIONI

Il lavoro di valutazione dello stato di conservazione ed efficienza ha permesso di approfondire le conoscenze sul meccanismo di degrado da scorrimento viscoso nel caso di tubazioni vapore. Pur avendo superato le 200.000 ore di esercizio si sono determinate percentuali di vita spesa comprese tra il 18 ed il 30%, valori inferiori rispetto alle altre membrature del generatore

(collettori uscita SH2 e collettori uscita RH). Ciò potrebbe ricondursi a parità di temperature ad uno stato tensionale meno sollecitato e dunque ad una conseguente minore velocità di comparsa delle microcricche a bordo grano.

In generale osserviamo inoltre che il circuito VP presenta un livello di degrado maggiore rispetto al circuito VRC relativamente alla ZTA. I gruppi SF5 e SF6 presentano la percentuale di vita spesa non superiore al 20%. I tratti di tubazione in corrispondenza dei primi quattro gruppi (SF1, SF2, SF3 e SF4) presentano mediamente le condizioni più critiche rispetto ai gruppi SF5 e SF6 ciò è in linea con l'andamento del fenomeno creep in funzione delle ore di funzionamento.

	anno messa servizio	ore di esercizio	% vita spesa			
			Collettori		Tubazioni	
			Collettori uscita RH	Collettori uscita SH2	VRC	VP
SF1	***1971***	***250.739***	*28,64*	*59,39*	*24,1*	*29,3*
SF2	***1971***	***248.606***	*28,32*	*67,40*	*24,0*	*29,3*
SF3	***1972***	***238.891***	*27,1*	*49,65*	*23,2*	*28,2*
SF4	***1973***	***239.759***	*22,15*	*42,92*	*23,1*	*28,1*
SF5	***1975***	***210.510***	*11,7*	*59,2*	*19,5*	*20,0*
SF6	***1976***	***202.735***	*9,7*	*17,1*	*18,8*	*23,8*

Tabella 5 – Confronto esito controlli scorrimento viscoso tra le diverse membrature dei 6 generatori di vapore

Il confronto della vita spesa deve essere condotto: Tra linee VRC ed i collettori RH; Tra linee VP ed i collettori SH2. Da cui possiamo estrapolare che il fenomeno dello scorrimento viscoso risulta meno evidente sulle tubazioni rispetto ai collettori; tale situazione è più apprezzabile per il circuito SH2.

Esaminando i grafici (vedi fig. 5) che scaturiscono da un'analisi statistica dei dati riportati nelle tabelle 3 e 4 possiamo concludere che: il MB presenta quasi esclusivamente una classe di danno pari a 1; in ZTA riscontriamo classi/grado da 1 a 2 con una presenza così suddivisa mediamente classe 1: 53%, classe 1/2: 38% e classe 2: 9% ; in ZF si registrano i livelli di classe più alti

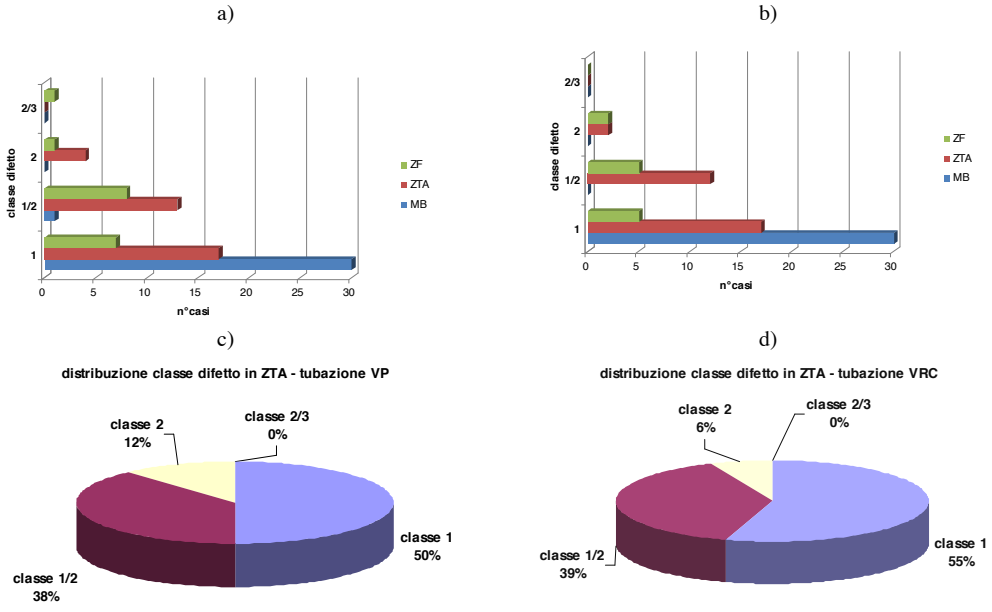


Figura 5 – Andamento della numerosità dei difetti suddivisi per classe.
Caso a) e c) Tubazione Vapore Principale (VP), Caso b) e d) Tubazione Vapore Risurriscaldato Caldo (VRC)

7. BIBLIOGRAFIA

[1] Linea Guida ISPESL – Valutazione della vita residua di componenti in regime di scorrimento viscoso – 2003

[2] X. C. Niu, J. M. Gong, Y. Jiang, J.T. Bao, "Creep damage prediction of the steam pipelines with high temperature and high pressure", International Journal of Pressure Vessels and Piping 86 (2009) 593–598

[3] ECCC RECOMMENDATIONS - VOLUME 6 [Issue 1] Residual Life Assessment and Microstructure – 27/07/05

[4] Linea Guida ISPESL – Valutazione della vita residua di componenti in regime di scorrimento viscoso – 2003

[5] F. Giacobbe,. C. De Petris, S. Benedetto, M. Lanzani, C. Sampietri, A. Branca "Piano dei controlli per la valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni di una centrale termoelettrica", atti Safap 2006

[6] UNI/TS 11325-1 Attrezzature a pressione – Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione – Parte 1: Valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica di integrità – Marzo 2009

[7] ASM Handbook - Volume 9 - Metallography and Microstructures

[8] UNI 9993.92 - Giunti saldati - Repliche in opera per l'esame microscopico

[9] UNI 7329.74 - Esame al microscopio elettronico dei materiali metallici mediante replica - Preparazione delle repliche per l'esame microstrutturale

[10] ASTM E 1351.06 - Production and Evaluation of Field Metallographic Replicas

NOTE

(1) ISPESL circolare 5 dicembre 2003, n. 48 - Procedura tecnica per le verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale.

(2) UNI/TS 11325-1 Attrezzature a pressione – Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione – Parte 1: Valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica di integrità

(3) Presenti quattro sezioni denominate SF1, SF2, SF3 e SF4 (gruppi caldaia a vapore, potenzialità: 508 t/h, pressione vapore: 170 kg/cm2, temperatura vapore uscita caldaia: 540 °C, potenza elettrica pari 160 MW) e due sezioni denominate SF5 e SF6 (gruppi caldaia a vapore, potenzialità: 1022 t/h, pressione vapore: 195 kg/cm2, temperatura vapore uscita caldaia: 540 °C, potenza elettrica pari a 320 MW).

sessione POSTER

8
ENOS: un programma di calcolo integrato per la valutazione della vita consumata a scorrimento viscoso

*C. Delle Site**
*A. Silvetti***
*R. Iovene****

** ISPESL DCC*
*** ISPESL DPO*
**** ISPESL Napoli*

1. ABSTRACT

A seguito dell'emanazione della circolare ISPESL n. 48/2003 l'ISPESL ha messo a punto una procedura interna di verifica delle attrezzature a pressione in regime di creep. All'interno di questa procedura si è pensato di sviluppare un software che includesse i passi fondamentali della verifica descritti nella Raccomandazione R5:2005 del CTi .Tale programma di calcolo è denominato ENOS (Creep Assessment of Components). I principali moduli contenuti nel programma e le procedure numeriche in essa implementate sono brevemente descritte in questa memoria.

2. INTRODUZIONE

Il programma di calcolo ENOS è nato dall'esigenza di tradurre in un software le procedure contenute nella Raccomandazione R5:2005 del CTi e nella linea guida LG/Creep dell'ISPESL (emanata a seguito della Circolare ISPESL n.48/2003). Il programma ENOS contiene peraltro gli aggiornamenti previsti dalla Specifica Tecnica sul Creep in fase di emanazione da parte dell'UNI ai sensi dell'art 3 del DM 329/04. Pur essendo sostanzialmente uno strumento di verifica nelle mani del tecnico ISPESL che effettua l'esame della documentazione di "ulteriore esercizio", il programma ENOS contiene degli elementi di originalità, che ne fanno uno strumento destinato anche allo studio ed alla ricerca. Infatti oltre a contenere procedure di verifica, ENOS consente di monitorare (tramite l'interfaccia con l'archivio SET-RISK) la situazione delle attrezzature in scorrimento viscoso, analizzandole il livello di rischio e la soglia di attenzione.

3. STRUTTURA DEL PROGRAMMA ENOS

ENOS è strutturato in maniera modulare comprendendo varie "routine" per il calcolo .Il primo modulo (ancora in fase di sviluppo) prevede il calcolo della sollecitazione di esercizio, il secondo modulo il calcolo della vita consumata, il terzo modulo la determinazione dell'intervallo di ricontrollo, il quarto modulo l'approccio FFS finalizzato a verificare il tempo di ulteriore esercizio, il quinto modulo la verifica di stabilità in presenza di sottospessori ed il sesto modulo la pianificazione dei controlli In particolare il modulo calcolo prevede tutte le opzioni contemplate dalla R5:2005 (ovvero metodi1,2 e3).

In figura 1 è rappresentata a scopo esemplificativo una "master curve" ottenuta interpolando i valori di sollecitazione disponibili nel codice

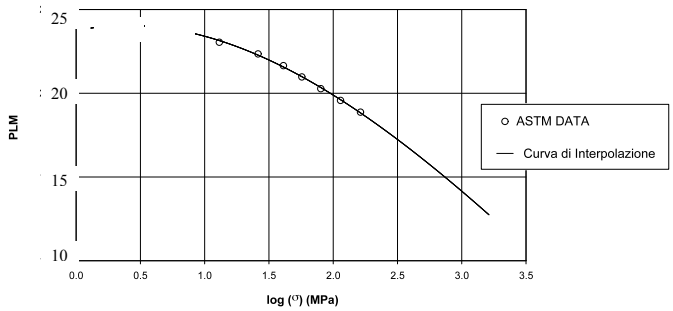


Figura 1 - Master Curve (ASTM A182 F 11)

3.1. Determinazione del periodo di ulteriore esercibilità sulla base di una procedura RBI

Il metodo utilizza dei fattori correttivi che applicati al tempo base di riferimento per il creep (50000 ore) determinano il periodo di ulteriore esercizio (figura 2). Il riferimento principale è sempre la procedura riportata nella citata raccomandazione R5:2005.

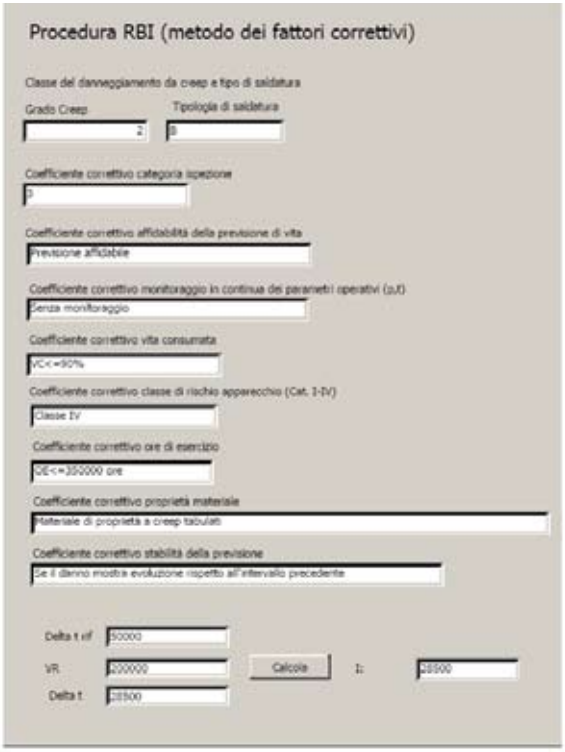


Figura 2 ENOS CODE – Metodo dei fattori correttivi per intervalli di ricontrollo

3.2. Determinazione del periodo di ulteriore esercibilità sulla base di una procedura FFS

Il metodo (fig. 3) è finalizzato alla determinazione delle ore di ulteriore esercizio associate ad un livello di rischio accettabile nel caso siano riscontrati difetti di dimensioni note (a, S). Il metodo adottato (solamente orientativo e non sostitutivo di una completa analisi FFS) fa

riferimento alla procedura Fitness for Service contenuta nel documento CTI R5:05 rev. 06 (route b, autore V. Bicego), procedura non adottata nella versione finale del documento.

Questo metodo si applica nel caso in cui si rilevino cricche o le repliche metallografiche individuino cricche da creep livello 4 o 5.

Il parametro da considerare è la crescita percentuale della cricca in un dato intervallo temporale. Tale parametro prende in considerazione la dimensione della cricca, lo spessore del componente e l'intervallo di ricontrollo.

$$PCS = \frac{\dot{a}\Delta t}{S - a} \tag{1}$$

dove:

PCS = Parametro di crescita nello spessore

Δt = intervallo di ricontrollo [h]

S = spessore del componente [m]

a = dimensione della cricca [m]

å = velocità di crescita della cricca [m/h]

La velocità di crescita della cricca in regime uniforme è espressa in funzione del parametro C* (High Temperature Crack Parameter [2 in bibliografia, come sopra, FITNET CEN WORKSHOP 22; 3 BS 7910]):

$$\dot{a} = A(C^*)^q \tag{2}$$

dove A e q sono costanti per un dato materiale (vedi tabella 1).

Inizialmente PCS va calcolato per un intervallo di ricontrollo "standard" (es. 50'000 ore).

La classe del difetto (CD) in relazione all'intervallo temporale è dato dalla seguente correlazione:

- $PCS < 0.002$ $CD = 1$
- $0.002 \leq PCS < 0.005$ $CD = 2$
- $0.005 \leq PCS < 0.01$ $CD = 3$
- $0.01 \leq PCS < 0.03$ $CD = 4$
- $0.03 \leq PCS < 0.05$ $CD = 5$

Il corrispondente livello di rischio è determinabile dalla tabella 2.

Una mitigazione del rischio è necessario qualora la tabella mostri alti valori del PIR. In tali casi occorre ridurre l'intervallo di ricontrollo.

Al contrario bassi livelli di rischio permettono di incrementare l'intervallo di ricontrollo.

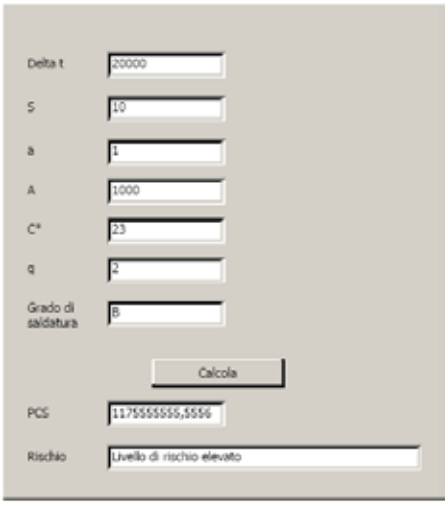


Fig. 3 ENOS CODE – Metodo FFS per intervalli di ricontrollo

La procedura, ripetuta in maniera iterativa, permette di giungere ai valori ottimali dell'intervallo di ricontrollo, corrispondente ad un livello di rischio accettabile in funzione della tipologia della saldatura (rif. R5:2005).

Occorre sottolineare che, nel caso vengano rilevate cricche da creep, è opportuno incrementare l'efficacia dell'ispezione. Inoltre i giunti saldati dovranno essere controllati con una estensione pari al livello massimo (PEC 5).

Material	Temperature (°C)	Upper Bound		Mean	
		A	q	A	q
Plain C steels	482 - 538	**0.015**	**1.0**	0.006	1.0
½CrMoV, wrought and cast	500 - 600	**0.06**	**0.80**	0.006	0.80
½CrMoV, type IV	540 - 565	**0.15**	**0.80**	0.007	0.80
½CrMoV, coarse HAZ	565	**0.30**	**0.80**	0.10	0.80
1CrMo	450-600	**0.02**	**0.84**	0.006	0.84
1CrMoV	538 - 594	**0.015**	**0.75**	0.005	0.79
2¼Cr1Mo weld metal	540 - 565	**0.01**	**0.647**	0.003	0.647
2¼Cr1Mo	550 - 600	**0.006**	**0.80**	0.004	0.83
Type 304 and Type 304H	650 - 760	**0.035**	**1.0**	0.007	1.0
Type 304, service exposed	760	**0.10**	**0.85**	0.05	0.85
Type 321, wrought	650	**0.02**	**0.90**	0.005	0.90
Type 316 and 316H, wrought	500 - 550	**0.02**	**0.81**	0.005	0.81
Type 316 weld	600 - 650	**0.06**	**0.876**	0.01	0.876
Inconel 800H	800	**0.08**	**0.90**	0.025	0.90
In 939	850	**0.20**	**1.0**	0.04	1.0
Modified 9Cr	580 - 593	**0.005**	**0.65**	0.003	0.70
Aluminium alloy RR 58	150	**2.5**	**0.85**	1.5	0.85
Aluminium alloy 2519 - T851	135	**0.35**	**0.90**	0.175	0.90
Astroloy API	700	**0.124**	**0.78**	0.05	0.79

Tabella 1 - Costanti nella legge di Creep Crack Growth (CCG). Fonte: FITNET procedure (gennaio 2005).

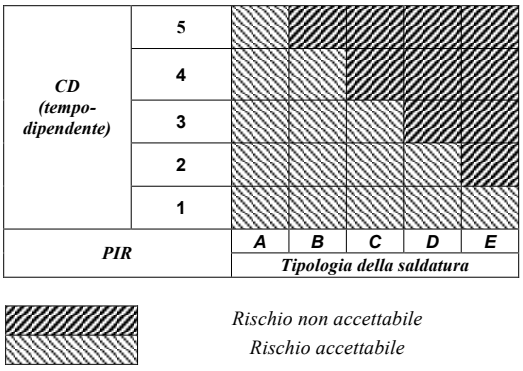


Tabella 2 - Matrice di rischio.

4. STRUTTURA DEL DATA-BASE SET-RISK

La banca dati SET nasce dall'esigenza di disporre di dati sintetici che possano riassumere con semplici indici o parametri il reale stato dell'apparecchio in scorrimento viscoso e il relativo livello di rischio.

Vengono presi a riferimento la dislocazione geografica dell'impianto, il numero di ore di esercizio, la percentuale di vita spesa oltre all'esito dei controlli e delle repliche.

L'esito dei controlli è ricondotto al giudizio dell'esaminatore mediante l'indice IC secondo quanto sinteticamente di seguito riportato:

IC=1 – esito totalmente positivo del controllo

IC=3 – sottospessori rispetto al nominale; verifica positiva in termini di stabilità della membratura

IC=5 – cricche o sottospessori oltre il nominale

4.1 Indice globale di pericolosità

Sulla base dei risultati ottenuti da calcoli e controlli è possibile determinare un indice sintetico che rappresenti il grado di pericolosità dell'attrezzatura.

Indicando con:

- H ore di esercizio
- V frazione di vita consumata
- IC indice controlli
- R grado di creep

viene computato l'indice globale di pericolosità, IGP:

$$IGP = \frac{(V + \frac{H}{500000} + \frac{IC}{5} + \frac{R}{5})}{4} \qquad (3)$$

4.2 Livello di attenzione

Oltre all'indice sintetico IGP, il data base computa anche il livello di attenzione (medio o alto) sulla base dei seguenti criteri:

Parametro	Valore	Livello di attenzione
Ore di esercizio	>350000	Alto
Vita consumata	>80%	Alto
Indice Controlli	>3	Alto
Grado Creep	>2	Alto

Tabella 3 – Criteri di determinazione del livello di attenzione

Il superamento della soglia di anche uno solo dei valori sopra riportati determina il passaggio di attenzione dal livello "medio" al livello "alto".

Tale situazione non significa automaticamente che l'impianto è in condizioni critiche per l'esercizio, ma indica piuttosto che è opportuno prestare una maggiore attenzione ai controlli eseguiti ed alle valutazioni effettuate.

Mediante tali indicatori è possibile, per l'Ente di controllo e per l'Utilizzatore identificare le attrezzature a pressione a maggior rischio "Creep" su cui concentrare attenzione mediante dettagliati piani di ispezione.

Matricola	Dipartimento	Ore esercizio	Data autorizzazione	Vita Consumata	Controlli	Creep	IGP	**Livello attenzione**
Xxx	FORLI	94000	13/08/2005	9.40%	3	4	0.42	**ALTO**
Xx	PESCARA	100000	29/02/2004	10.00%	1	1	0.18	**medio**
X	PESCARA	124600	29/02/2004	27.10%	1	5	0.43	**ALTO**
Xxyy	ANCONA	175000	31/08/2002	30%	1	1	0.26	**medio**
yyxx	ANCONA	175000	31/08/2002	30%	1	1	0.26	**medio**

Tabella 4 – Esempio dell'archivio sintetico Set-Risk

5. CONCLUSIONI

ENOS costituisce un programma di calcolo di estrema semplicità per effettuare le valutazioni richieste dalla circolare ISPESL n.48/2003. Nella sua più recente versione esso è in linea con le modifiche introdotte dalla Specifca Tecnica di cui all'art.3 del DM 329/04. Grazie all'interfaccia con il database SET-RISK, ENOS è in grado di modulare i piani ispettivi sul componente in funzione del reale Stato di rischio dello stesso.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] R. E. Kessler, Using Oxide Kinetics as a Fitness-for-Service Tool, EPRI Conference on Advances in Life Assessment and Optimization of Fossil Power Plants, 11-13 March 2002, Orlando, Florida;

[2] R. K. Singh Raman, Oxide Scales in the Context of Life Assessment and Microstructural Degradation of Weldments of Cr-Mo Steel in Steam Generation Systems, EPRI Conference on Advances in Life Assessment and Optimization of Fossil Power Plants, 11-13 March 2002, Orlando, Florida;

[3] L. D. Nottingham, H. E. Queen, Ultrasonic Detection and Characterization of Incipient Creep Damage in High Energy Piping Seam Welds, EPRI Conference on Advances in Life Assessment and Optimization of Fossil Power Plants, 11-13 March 2002, Orlando, Florida;

[4] L. Bisbee, Asset Management of Critical Fossil Power Plants Components, Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, 13-15 ottobre 2005, Milano;

[5] M. Tilley, Acoustic Emission Monitoring for Inspection of High Energy Steam Piping, EPRI Conference on Advances in Life Assessment and Optimization of Fossil Power Plants, 11-13 March 2002, Orlando, Florida;

[6] K. Penny, W. Kohlhöfer, Some Neglected NDE Tools, ECCC Creep Conference, 12-14 September 2005, London;

[7] R. Hurst, C. Stratford, V. Bicego, Standardisation – A Route to Enhancing the Acceptability of the Small Punch Creep Test, ECCC Creep Conference, 12-14 September 2005, London;

[8] H. Hulstof, P. Welberg, Creep Strain Measurements for Risk Based Monitoring of Steam Pipes and Headers, ECCC Creep Conference, 12-14 September 2005, London;

[9] R. Viswanathan, Life Assessment of High Temperature Components, EPRI Conference on Advances in Life Assessment and Optimization of Fossil Power Plants, 11-13 March 2002, Orlando, Florida;

[10] C. Fossati, C. Sampietri, Determinazione del periodo di ulteriore esercibilità prima del successivo controllo per un componente soggetto a scorrimento viscoso, Convegno sulla vita residua di componenti funzionanti in regime di scorrimento viscoso, 21-22 giugno;

[11] ECCC Recommendations 2005, European Creep Collaborative Committee;

[12] G. Muravin, B. Muravin, D. Ezra, Quantitative Acoustic Emission Non- Destructive Method, EPRI Conference on Advances in Life Assessment and Optimization of Fossil Power Plants, 11-13 March 2002, Orlando, Florida;

[13] L. M. Rogers, Structural and Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods – Fundamental and Applications, Lloyd's Register, September 2001

sessione POSTER

9
La valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in un impianto di produzione Ammoniaca ed Urea: un approccio sistematico per l'ispezione e la manutenzione delle apparecchiature a pressione in conformità al D.M. 329/4 ed introduzione alla Risk Based Inspection

*G. Franceschini**
*G.A. Zuccarello** - F. Zichichi***

**Inspection and Material Engineer, Yara Upstream Production*
***I.S.P.E.S.L. - Dipartimento Territoriale di Bologna*

SOMMARIO

In questo articolo viene illustrato l'approccio utilizzato per effettuare il censimento, la descrizione, la classificazione e la valutazione sullo stato di conservazione ed efficienza di tubazioni in esercizio alla data di entrata in vigore del decreto D.M. 329/04 e non certificati secondo il decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 istallate nel sito produttivo Yara Italia S.p.A. Stabilimento di Ferrara.

Si descrivono le due fasi del lavoro svolto per giungere alla valutazione finale delle tubazioni: la prima, del tutto generale, che include la divisione del sito in singole unità produttive, il censimento, la raccolta dati e la classificazione delle linee; la seconda fase, specifica per ogni gruppo di linee ispezionate, che comprende lo studio dei meccanismi di danneggiamento, la scelta di metodi di controllo non distruttivi (CND) efficaci per l'individuazione dei danneggiamenti attesi ed infine la valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni con l'indicazione dell'ulteriore possibilità di esercizio delle stesse.

Vedremo inoltre come utilizzando la Risk Based Inspection, nel contesto del D.M.329 [1], sia possibile: a) concentrare le ispezioni laddove il rischio è più elevato ottimizzando così i piani di ispezione; b) aumentare la conoscenza delle reali condizioni degli impianti con maggior consapevolezza dei rischi presenti e quindi con un miglioramento generale del livello di sicurezza e di affidabilità degli impianti stessi; c) dare supporto tecnico ad eventuali richieste di deroga per superare i vincoli di fermata imposti di fatto dalle frequenze di verifica, stabilite nel D.M.329, non sempre compatibili con le esigenze di produzione di impianti a ciclo continuo.

1. NUOVA LEGGE SULL'ESERCIZIO DELLE APPARECCHIATURE A PRESSIONE: IL D.M.329/04

Il D.M. 1 dicembre 2004 n. 329 stabilisce le norme per l'utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi. Rispetto alla precedente legislazione, il Decreto pone importanti novità, da affrontare da parte dell'Utilizzatore di impianti di produzione a ciclo continuo, e da verificare da parte di ISPESL.

Tali tematiche riguardano:

1) Le tubazioni, per le quali in passato, non era previsto alcun controllo "di legge". Con l'uscita del Decreto, le tubazioni con Pressione Massima Ammissibile superiore a 0,5barg e Diametro

Nominale superione ad 80 devono essere censite e valutate. Il campo di applicazione della nuova norma sull'esercizio delle apparecchiature a pressione risulta quindi molto più vasto rispetto alla precedente legislazione e di difficile gestione per il gran numero di tubazioni presenti negli impianti di produzione ammoniaca e urea;

2) I generatori di vapore, per i quali viene introdotta una visita interna ogni 2 anni (contestualmente alla verifica di funzionamento). La fermata dei generatori di vapore ogni 2 anni non risulta però compatibile con gli intervalli di fermata programmata (4 o 5 anni) degli impianti di produzione ammoniaca e urea;

3) Le valvole di sicurezza (Pressure Safety Valve, PSV), le quali, prima del D.M.329, erano dispositivi autonomi da verificare ogni 3 anni. Con il D.M.329, le PSV sono collegate all'apparecchiatura da esse stesse protette e devono essere verificate contestualmente alla verifica di funzionamento dell'apparecchio: per un apparecchio di Cat. IV, e fluido gruppo I, ogni 2 anni. Come per il punto 2 sopra, fermare ogni 2 anni per la taratura delle PSV non è compatibile con gli intervalli di fermata programmata degli impianti di produzione ammoniaca e urea.

In quest'articolo ci occuperemo solo del primo punto sopra menzionato, ovvero le tubazioni. Per gli altri due temi, riguardanti i generatori di vapore e le valvole di sicurezza, ci limitiamo soltanto a dire che sono stati sviluppati ed approvati dal Ministero competente dei piani ispettivi alternativi a quelli elencati nelle tabelle di cui agli allegati A e B del D.M.329. Utilizzando la metodologia Risk Based Inspection, RBI, si è dimostrato quel principio di equivalenza di diversi piani di ispezione sancito nell'art.10 comma 5 del D.M.329: *"...Ispezioni alternative e con periodicità differenti da quelle elencate, ma tali da garantire un livello di protezione equivalente, possono essere accettate per casi specifici, nonché per determinate tipologie, fatto salvo quanto previsto nelle istruzioni per l'uso rilasciate dal fabbricante dell'attrezzatura stessa e previa autorizzazione del Ministero delle attività produttive; la relativa richiesta di deroga dovrà essere presentata dall'utente corredata da un'adeguata relazione tecnica."*

2. ISPEZIONE E DENUNCIA TUBAZIONI SECONDO D.M.329

Al fine di una migliore gestione del gran numero di tubazioni presenti, il sito Yara Italia S.p.A., stabilimento di Ferrara, è stato suddiviso nelle seguenti unità produttive:

1. Ammoniaca;
2. Urea;
3. Carico ammoniaca, RAMPE, Pipeline ammoniaca, PIPE, Stoccaggio ammoniaca, CRIO;
4. Soluzione ammoniacale;
5. Impianto liquefazione CO2;
6. Impianto recupero Argon, IGI.

L'approccio seguito per l'ispezione e la denuncia tubazioni secondo D.M.329 è composto di due fasi principali: la prima di carattere generale e la seconda specifica per ciascun gruppo di tubazioni ispezionate.

Le due fasi sono state ripetute per ognuna delle unità produttive in cui lo stabilimento è stato suddiviso.

La valutazione dello stato conservazione di conservazione delle tubazioni presenti in stabilimento è stato sicuramente un lavoro di grande impegno in termini di tempi e costi. Il lavoro è stato seguito come progetto con un budget ed un programma temporale ben definiti (Vedi Tab. 1).

Titolo progetto	Risorse interne Yara dedicate	Risorse esterne impiegate	Data inizio/ Data fine	Costo
Valutazione Piping	1XIspezione, 1XManutenzione, 1XProcesso	IIS, Donegani, Eurocontrol	Lug. 2006/ Feb. 2009	300k€

Tabella 1 – Progetto valutazione stato conservazione piping: durata, risorse e costi

2.1 Fase 1: censimento, raccolta dati e classificazione delle tubazioni

Il punto di partenza del lavoro è stato l'aggiornamento dei P&IDs (Piping and Instrument Diagrams) con la verifica in campo della rispondenza degli stessi con l'effettiva istallazione delle tubazioni. Dai P&IDs sono stati estratti gli elenchi linee presenti in ogni unità produttiva:

- Ammoniaca: 2934 tubazioni

- Urea: 1971 tubazioni
- Stoccaggio ammoniaca, CRIO: 286 tubazioni
- Pipeline ammoniaca, PIPE: 31 tubazioni
- Carico ammoniaca, RAMPE: 99 tubazioni
- Soluzione ammoniacale: 31 tubazioni
- Impianto liquefazione CO2: 76 tubazioni
- Impianto recupero Argon, IGI: 223 tubazioni
- Totale tubazioni: 5630 tubazioni

Per ogni tubazione sono stati raccolti i dati necessari alla classificazione della tubazione stessa nelle diverse categorie previste dal decreto legislativo n. 93/2000 ed anche tutti i dati necessari alla successiva valutazione dei risultati delle ispezioni. Per la raccolta dati sono state utilizzate le specifiche di linea, gli elenchi linee originali di costruzione, gli isometrici ed i dati di processo forniti da DCS.

Nella Fig. 1 si riporta un estratto di tali elenchi.

UNITA'	LINEA	DESCRIZIONE	CLASSE	DATA	ISOMETRICO	T (°C) Progetto	P (Bar g) Progetto	DN (mm)	FLUIDO	GRUPPO FLUIDO	FASE	Tab. PED	Cat. PED	Soggetta a DM 329	Materiale	Codice Tubo	Spessore (mm)	Sovraspessore di corrosione (mm)	COIBENTATA
UREA	VR944	Dalla linea VR909 alla linea VB902	71C1	1975	A1 foglio008	150	2.91	200	VAPORE DI RECUPERO	II	GAS	7	art 3.3	NO	Acciaio al C	T41	3.96	1	SI
UREA	VR943	Dalla linea VR909 a DF 901 S	71C1	1975	A1 foglio007	150	2.91	25	VAPORE DI RECUPERO	II	GAS	7	art 3.3	NO	Acciaio al C	T61	2.3	1	SI
UREA	VR942	Dalla linea VR909 a DF 901 A	71C1	1975	A1 foglio007	150	2.91	25	VAPORE DI RECUPERO	II	GAS	7	art 3.3	NO	Acciaio al C	T61	2.3	1	SI
UREA	VR941	Dalla linea VR909 alla linea VB903	71C1	1975	A1 foglio020	150	2.91	40	VAPORE DI RECUPERO	II	GAS	7	art 3.3	NO	Acciaio al C	T61	2.6	1	SI
UREA	VR940	Dalla linea VR901 alla linea VB906	71C1	1975	B1 foglio021	150	2.91	80	VAPORE DI RECUPERO	II	GAS	7	art 3.3	NO	Acciaio al C	T61	3.18	1	SI
UREA	VR939	Dalla linea VR938 alla linea JU948	71C1	1975	A1 foglio002	150	2.91	20	VAPORE DI RECUPERO	II	GAS	7	art 3.3	NO	Acciaio al C	T81	2.87	1	SI
UREA	VR938	Dalla linea VR909 alla linea JU964	71C1	1975	A1 foglio003	150	2.91	25	VAPORE DI RECUPERO	II	GAS	7	art 3.3	NO	Acciaio al C	T61	2.3	1	SI
UREA	VR937	Dalla linea VR909 alla linea JUC905	71C1	1975	A1 foglio007	150	2.91	20	VAPORE DI RECUPERO	II	GAS	7	art 3.3	NO	Acciaio al C	T81	2.87	1	SI

Fig. 1 – Estratto elenco linee impianto Urea, Yara Ferrara

Tutta la documentazione riguardante la costruzione delle tubazioni stesse è stata raccolta: P&IDs, specifiche di linea, specifiche tubi, specifiche materiali, isometrici, report controlli non distruttivi. La documentazione è stata poi archiviata ed è ora accessibile nella rete informatica interna Yara (Fig. 2).

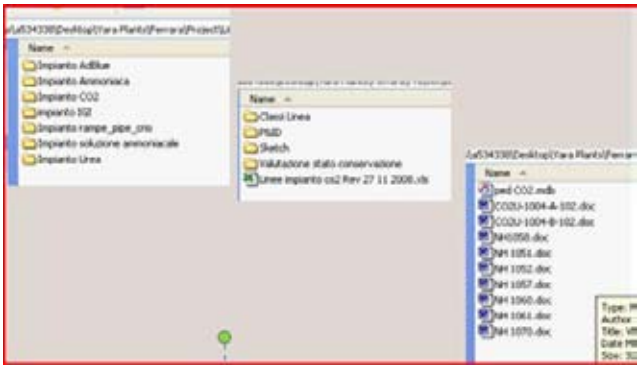


Fig. 2 – Archiviazione informatica documentazione tubazioni

Le informazioni raccolte sono state successivamente inserite in un database costruito appositamente per la gestione di tutti questi dati ed in particolare per l'estrazione rapida delle linee soggette a DM 329 (Fig. 3).

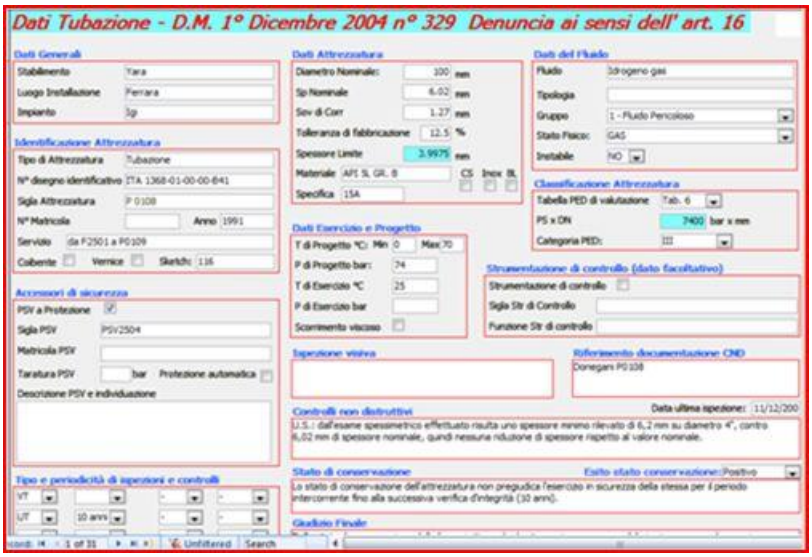


Fig. 3 – Database tubazioni

Effettuato il censimento di tutte le tubazioni presenti in stabilimento, si è determinato quali fossero le tubazioni da denunciare ad ISPESL, ovvero quelle mai assoggettate ad omologazioni o controlli di legge, per i quali le caratteristiche tecniche rientrano tra quelle che individuano le condizioni d'obbligatorietà alla riqualificazione periodica: circa il 12% delle tubazioni dello stabilimento Yara di Ferrara (700 su un totale di 5630 tubazioni) sono state valutate e denunciate.

2.2. Fase 2: studio meccanismi di danneggiamento attesi, scelta di metodi di controllo non distruttivi (CND), ispezione e valutazione

Terminata la fase 1, le tubazioni sono state ispezionate e quindi successivamente valutate con priorità determinate in base alla pericolosità del fluido in esse contenuto:

1. Linee ammoniaca;
2. Linee gas di sintesi e metano;
3. Linee carbammato d'ammonio;
4. Linee vapore HPS;
5. Altre linee.

Il processo utilizzato per la valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni è formalmente lo stesso per ciascun gruppo di linee:

a. Studio meccanismi di danneggiamento potenzialmente attivi, ovvero uno studio preliminare sulle condizioni di esercizio e progetto delle linee, con individuazione e descrizione dei meccanismi di danneggiamento potenzialmente attivi (riferimento a norme API RP571 [3], API RP581 [5], circolare e linee guida ISPESL per componenti in regime di scorrimento viscoso [10] e [11]);
b. Scelta di metodi di controllo non distruttivi (CND) efficaci per l'individuazione dei danneggiamenti attesi: ispezione visiva, controllo spessimetrico con ultrasuoni, controllo magnetoscopico saldature, controllo difettoscopico con ultrasuoni delle saldature, esame micrografico mediante repliche metallografiche;
c. Esecuzione CND;
d. Eventuali verifiche di stabilità [8] a seguito di CND con indicazioni rilevanti;
e. Valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni con indicazione dell'ulteriore possibilità di esercizio delle stesse sulla base dei risultati delle ispezioni effettuate.

La valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni è stata quindi eseguita sulla base di controlli specifici ed un giudizio è stato emesso per ciascuna linea. Eventualmente, si sono indicate delle azioni manutentive da eseguire ed un intervallo di ricontrollo appropriato alle condizioni della tubazioni.

Nella Fig. 4 si riporta un estratto delle tabelle inviate ad ISPESL (una per ogni unità produttiva) per la denuncia delle tubazioni con l'indicazione dei principali dati della tubazione nonché il rifermento al report dei CND effettuati, l'esito dei controlli, l'intervallo di ricontrollo e i dispositivi di sicurezza a protezione della linea stessa.

Sigla	Servizio	P & ID	DN	PS	TS °C min	TS °C max	Fluido	Gruppo	Stato Fis	Tab PED	Cat PED	Rif. CND	Ultima Isp	Esito	Int. Ric	PSV
P0109	Linea dalla linea P0108 a CY 2501	ITA 1368-01-00-00-B41	100	74	0	70	Idrogeno gas	1	Gas	Tab. 6	III	Donegani P0109	11/12/2008	Positivo	10	PSV 2514
P0100	Linea dalla linea P0087 alla linea FG0059	ITA 1368-01-00-00-B41	100	74	0	70	Idrogeno gas	1	Gas	Tab. 6	III	Donegani P0100	11/12/2008	Positivo	10	PSV 2502
P0087	Linea dalla linea P0019 a D 2501 A	ITA 1368-01-00-00-B41	100	74	0	70	Idrogeno gas	1	Gas	Tab. 6	III	Donegani P0087	11/12/2008	Positivo	10	PSV 2502
P0091	Linea dalla linea P0019 a D 2501 B	ITA 1368-01-00-00-B41	100	74	0	70	Idrogeno gas	1	Gas	Tab. 6	III	Donegani P0091	11/12/2008	Positivo	10	PSV 2503
P0103	Linea dalla linea P0105 a F 2501	ITA 1368-01-00-00-B41	100	74	0	70	Idrogeno gas	1	Gas	Tab. 6	III	Donegani P0103	11/12/2008	Positivo	10	PSV 2504

Fig. 4 – Elenco generale Denuncia ai sensi dell'art. 16 del D.M. 1° Dicembre 2004 n.329 – Tubazioni impianto IGI

Evidentemente ciascun gruppo di tubazioni è soggetto a meccanismi di danneggiamento diversi e quindi è stato ispezionato con tecniche diverse: nei prossimi paragrafi vedremo allora quanto è stato fatto per i diversi gruppi di tubazioni.

2.2.1. Tubazioni ammoniaca

In un impianto di produzione ammoniaca le tubazioni contenenti ammoniaca costituiscono il gruppo di tubazioni più rilevante, sia per il numero che per la tossicità del fluido in esse contenuto. Per tale motivo, l'approccio generale per la valutazione dello stato di conformità è stato approfondito ed esteso sviluppando un piano di ispezione con un campo di applicazione molto più vasto rispetto a quanto stabilito dai requisiti minimi sanciti nel D.M.329.

In particolare, utilizzando la metodologia della RBI (descritta in API RP580 [4] e API RP581 [5]), si sono tenute in considerazione le frequenze generiche di rottura delle tubazioni.

Come visibile nella Fig. 5, le frequenze generiche di rottura delle tubazioni con diametro inferiore a DN50 sono di un ordine di grandezza superiore a quelle delle tubazioni con diametri maggiori: per l'affidabilità e la sicurezza dell'impianto risulta quindi fondamentale l'ispezione dettagliata di queste tubazioni e non solo di quelle con DN>80 che ricordiamo essere solo il requisito minimo sancito dal D.M.329 e non certo la "Best Practice".

Censite tutte le tubazioni contenenti ammoniaca, si sono poi identificati i meccanismi di danneggiamento attesi: corrosione esterna, corrosione da sottocoibente, fatica meccanica.

Infine, senza entrare nel dettaglio del calcolo delle conseguenze e probabilità di rottura (ben descritto in API RP581 [5]), partendo dalle frequenze generiche di rottura sopra menzionate e, correggendole con dei fattori moltiplicativi dovuti ai meccanismi di danneggiamento identificati, si è giunti alla valutazione del rischio relativo per ciascuna linea e si è sviluppato il seguente piano di ispezione:

- Prima ispezione visiva al fine di verificare lo stato della coibentazione, dei supporti, eventuali disallineamenti e vibrazioni;
- Ispezione con CND:
  - Radiografia digitale e, laddove quest'ultima non possibile, rimozione della coibentazione e spessimetrie UT;

- Radiografia digitale sul 50% di stacchi con Diametro Nominale DN<50;
- Radiografia digitale sul restante 50% di stacchi con Diametro Nominale DN<50 in caso di indicazioni rilevate nel primo gruppo di radiografie;

• Aggiornamento della valutazione del rischio dopo le ispezioni ed eventuali manutenzioni. Nella Fig. 6 si evidenzia l'effetto delle ispezioni e manutenzioni sul rischio: si noto lo spostamento verso le categorie di rischio più basse (in colore verde).

Equipment Type	Component Type	*gff* as a Function of Hole Size (failures/yr)				gff_{total} (failures/yr)
		Small	Medium	Large	Rupture	
Compressor	COMPC	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	0	3.00E-05
Compressor	COMPR	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Heat Exchanger	HEXSS	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Heat Exchanger	HEXTS	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Heat Exchanger	HEXTUBE	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPE-1	2.80E-05	0	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-2	2.80E-05	0	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-4	8.00E-06	2.00E-05	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-6	8.00E-06	2.00E-05	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-8	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPE-10	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPE-12	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPE-16	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPEGT16	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05

Fig. 5 – Frequenze generiche di rottura per tubazioni



Fig. 6 – RBI, effetto delle ispezioni e manutenzioni sulle categorie di rischio per le tubazioni ammoniaca

Il meccanismo di danneggiamento prevalente è risultato, come atteso, la corrosione da sottocoibente. La radiografia digitale (vedi fig. 7) si è dimostrata estremamente efficace nell'identificazione del danneggiamento consentendo l'osservazione del profilo del tubo senza la rimozione della coibentazione e con la tubazione in esercizio.

Oltre alle attività ispettive, nel processo di valutazione dello stato di conservazione delle tubazioni ammoniaca è sembrato opportuno inserire le verifiche effettuate relativamente ai rischi di impianto identificati nello studio HAZOP (HAZard and OPerability) [12]. Da tale studio, obbligatorio per procedura interna Yara, sono stati estratti i rischi riguardanti la tubazioni ammoniaca, ovvero:

- Dilatazione di liquido in tratti di linea erroneamente intercettati: dalla verifica è emersa la necessità dell'istallazione di valvole di sfioro in 3 tubazioni;
- Colpo d'ariete dovuto a chiusura automatica di valvole. La verifica delle tensioni generate dall'onda di pressione rispetto alle tensioni ammissibili (vedi Fig. 8) ha mostrato il buon design delle linee rispetto al colpo d'ariete.

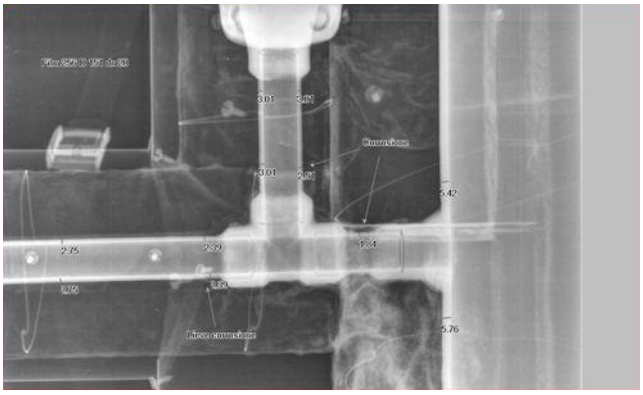


Fig. 7 – Radiografia digitale su tubazioni ammoniaca

Type	n°	P&ID	Line	Pipe class	DN	Length (mt)	Closing Time (sec)	Symbol
USV	1501	A8	150-NH216-35C2	35C2	150	400	9	1
USV	1502	A8	250-NH150-35C2	35C2	250	5	9	2
USV	1503	A9	150-NH217-34D2	34D2	150	20	9	3
USV	1504	A9	150-NH217-34D2	34D2	100	20	9	4
USV	1505	A9	150-NH217-34D2	34D2	100	200	9	5
USV	1507	A8	150-NH216-35C2	35C2	150	500	9	7
USV	1508	A8	D151	35C2	100	200	9	8
USV	1509	A8	250-NH150-35C2	35C2	250	5	9	9
USV	1511	A8	80-NH214-35C2	35C2	80	500	9	11
USV	1512	A8	80-NH214-35C2	35C2	80	500	9	12
USV	1519	A8	D151	35C2	100	200	9	19
USV	1529	A12	25-NH328-35C2	35C2	25	100	9	29
USV	1537	A8	D151	35C2	100	200	9	37

Valve closure Time (s)		3,5											
Line length (m)													
500	Sudden closure	23,67894	25,66247	35,78693	39,8	11, 12		83,68279	92,67178	1[illegible]952	116,9252	125,4056	
325	Sudden closure	23,67894	25,66247	35,78693	39,8		56,46068	83,68279	92,671		116,9252	125,4056	
200	Slow closure	12,28961	13,35827	18,90709	21,18899	27,54566	30,72		1, 7		60,27563	76,81006	
100	Slow closure	9,144806	9,920006	14,06893	15,76691	20,49698	22,86	8, 19, 37			50,80		
50	Slow closure	7,572		11,64985	13,05587	16,97263	18,93		39,1676	42,0	9, 2		
20	Slow closure	6,628	29	10,1984	11,42924	14,85902	16,5724	25,496	28,57311	34,28773	36,82		
10	Slow closure	6,314		9,714585	10,88704	14,15315	15,7862	24,29646	27,21759	32,66111	35,08043	39,46556	
5	Slow closure	6,15724	6,692652	9,472677	10,61593	13,80071	15,3931	23,68169	26,53963	31,84779	34,20685	[illegible]0875	
2	Slow closure	6,062896	6,590104	9,327532	10,45327	13,58925	15,15724	23,31883	26,13317	31,35981	33,68276	37,89531	
1	Slow closure	6,031448	6,555922	9,279151	10,39905	13,51876	15,07862	23,19768	25,99762	31,19715	33,50804	37,69655	
35C2	Thickness	2	2,3	2,6	2,9	2,9	3,2	2,6	2,9	2,9	3,6	4	
	Diameter	20	25	40	50	65	80	100	125	150	200	250	

Valve closure Time (s)		3,5000											
Line length (m)													
500	Sudden closure	36,77628	39,88120789	55,78784	62,22941	79,88883	88,5699	97,79082	97,79082	105,0938	117,7543	131,8369	
325	Slow closure	25,22062	27,41371584	38,80095	43,48383	56,52897		70,05727	70,05727	75,66196	85,49362	88,80499	
200	Slow closure	21,28961	23,14088199	32,75325	36,70623	47,71809	5	59,13781	59,13781	63,86683	72,16817	74,96142	
100	Slow closure	18,14481	19,72261491	27,91503	31,28415	40,66939		50,40224	50,40224	54,43442	61,50782	63,99018	
50	Slow closure	16,5724	18,01348137	25,496	28,57311	37,14504	41,43101	46,03445	46,03445	49,71	[illegible]64	58,35353	
20	Slow closure	15,62896	16,98800124	24,04456	26,94648	35,03043	39,0724	43,41378	43,41378	46,03	[illegible]53	55,03155	
10	Slow closure	15,3144	16,64617453	23,56074	26,40428	34,32656	38,2	[illegible]022	42,54022	45,94	[illegible]49	53,92423	
5	Slow closure	15,15724	16,47526118	23,31883	26,13317	33,97312	37,8	[illegible]845	42,10345	45,47172	51,38048	53,37056	
2	Slow closure	15,06289	16,37271317	23,17369	25,97051	33,76166	37,65	[illegible]538	41,84138	45,18869	51,06066	53,03837	
1	Slow closure	15,03145	16,3385305	23,1253	25,91629	33,69118	37,57862	41,75402	41,75402	45,09434	50,95406	52,92763	
34D2	Thickness	2	2,3	2,6	2,9	2,9	3,2	3,6	4,5	5	5,9	7,1	
	Diameter	20	25	40	50	65	80	100	125	150	200	250	

Fig. 8 – Colpo d'ariete: verifica tubazioni in funzione di lunghezza e diametro

2.2.2 Tubazioni gas di sintesi e metano

Anche le tubazioni contenenti gas di sintesi o metano, come le tubazioni ammoniaca, sono estremamente pericolose: in questo caso non per la tossicità del fluido ma per la sua estrema infiammabilità. Secondo lo stesso ragionamento sulle frequenze generiche di rottura, anche per questo gruppo di linee si sono estese le ispezioni a tutti gli stacchi con DN<50.

Diversi sono invece i meccanismi di danneggiamento potenzialmente attivi:

- Corrosione esterna;
- Corrosione da sotto coibente (CUI);
- Fatica meccanica;
- Erosione e corrosione uniforme interna;
- Scorrimento viscoso a caldo (Creep);
- Attacco da idrogeno ad alta temperatura (High Temperature Hydrogen Attack, HTHA).

Poiché parleremo dei controlli per la rilevazione del danneggiamento da scorrimento viscoso descrivendo le ispezioni effettuate sulle tubazioni del vapore ad alta pressione, per le linee gas di sintesi e metano ci limitiamo ad accennare la verifica effettuata per la probabilità di accadimento di attacco da idrogeno ad alta temperatura ed i CND effettuati sulle linee potenzialmente soggette a questo meccanismo di danneggiamento.

La verifica per HTHA è stata effettuata determinando un indice di probabilità di accadimento secondo API RP581 [5]. Per ogni tubazione, è stato calcolato il parametro, Pv, dipendente dalla pressione parziale di idrogeno PH2, dalla temperatura, T, e dal tempo di esercizio, t, della tubazione secondo l'equazione (1).

$$P_v=\log(P_{H2})+3{,}09\cdot 10^{-4}\cdot T\cdot(\log(t)+14) \qquad (1)$$

Il valore di Pv ottenuto è stato poi confrontato con i valori di riferimento, specifici per tipo di materiale, tabulati in [5]. Dal confronto si è determinato un indice di "suscettibilità": "Not susceptible to HTHA", "Low susceptibility to HTHA", "Medium Susecptibility to HTHA", "Highly susceptible to HTHA".

Nella Fig. 9 si riporta un estratto dell'analisi effettuata. In funzione del risultato ottenuto si è scelta l'estensione delle ispezioni da effettuare: da 0% per linee "Not susceptible to HTHA" a 100% per quelle "Highly susceptible to HTHA".

L'ispezione è stata effettuata con la tecnica più efficace nella rilevazione di HTHA: una combinazione di tecniche ad UT backscatter e UT velocity ratio [3].

LINE	DESCRIPTION	PIPE SPEC	Top (°C)	P op (Kg/cm2)	PH2 Max (psi)	T (°F)	Symbol	Figure	Pv (API RD681 app. I)	Main Material	Susceptibility H (API RD681 ap
GS 105	DA E 501 A E 501 A	04LJ3	325	265	1884,2	617		Fig 1	5,703330072	2 1/4Cr-1Mo	Not susceptib
GS 217	DA E 311B A R 311	01F12	310	26	277,3	590		Fig 2	4,781321526	C-0,5Mo	Not susceptib
GS 224	DA E209 A LINEA GS217	01F12	320	26	221,8	608		Fig 2	4,744296366	C-0,5Mo	Not susceptib
GS 225	DA GS 217 A E 209	01F12	310	26	221,8	590		Fig 2	4,684411513	C-0,5Mo	Not susceptib
GS 4002	DA E 208A/B A R 202	01F12	380	29	230,9	716		Fig 2	5,121066909	C-0,5Mo	Not susceptib
GS 4003	DA GS 4002 A PRC 212	01F12	380	29	137,5	716		Fig 2	4,895757627	C-0,5Mo	Not susceptib
GS 14003	DA LINEA N 1528 A R 103	01F12	400	38	10,8	752		Fig 2	3,911064181	C-0,5Mo	Not susceptib
GS 10301	DA B 501 A LINEA GS 10202	H	500	170	1498,8	932		Fig 1	6,651939727	6-Cr0,5Mo	Not susceptib
GS 203	DA E 210 A E 211	02F12	340	28	238,9	644		Fig 1	4,896250754	1Cr-0,5Cr	Not susceptib
GS 205	DA GS203 A LINEA GS204	02F12	340	28	238,9	644		Fig 1	4,896250754	1Cr-0,5Cr	Not susceptib
GS 218	DA R 311 A E 311B	02F12	352	25	266,6	665,6		Fig 1	5,015804568	1Cr-0,5Cr	Not susceptib
GS 204	DA E 211B A R 203	DA9	220	28	238,9	428		Fig 1	4,177632522	Carbon steel	Not susceptib
GS 206	DA R 203 A D 305	DA9	237	27	238,0	458,6		Fig 1	4,277882943	Carbon steel	Not susceptib
GS 207	DA GS204 A LINEA GS206	DA9	220	28	238,9	428		Fig 1	4,177632522	Carbon steel	Not susceptib
GS 208	DA GS206 A PRC 225A/B	DA9	237	27	238,0	458,6		Fig 1	4,277882943	Carbon steel	Not susceptib

fig. 9 - Tabella di verifica per attacco da idrogeno ad alta temperatura

Per ogni linea si è inoltre sovrapposto il punto rappresentativo delle condizioni di esercizio della linea stessa alle curve di Nelson API RP941 [9] (vedi Fig. 10). Tali curve, specifiche per tipo di materiale, definiscono una regione (al di sotto della curva stessa) in cui il materiale può essere esercito senza subire danneggiamento da HTHA in quelle condizioni di temperatura e pressione parziale di idrogeno. Particolare attenzione è richiesta per le tubazioni in acciaio 0.5Mo: la resistenza all'attacco da idrogeno di questo materiale si è dimostrata negli anni fortemente variabile e pertanto per la verifica si raccomanda in [9] di utilizzare la curva relativa all'acciaio al carbonio: per tubazioni costruite nel 1975 in acciaio 0.5Mo (quando tale variabilità non era nota) il punto rappresentativo delle condizioni di esercizio cade al di sopra delle curva di Nelson da utilizzare per la verifica ovvero quella relativa all'acciaio al carbonio (vedi Fig. 11). Su queste linee si sono pertanto concentrate le ispezioni.

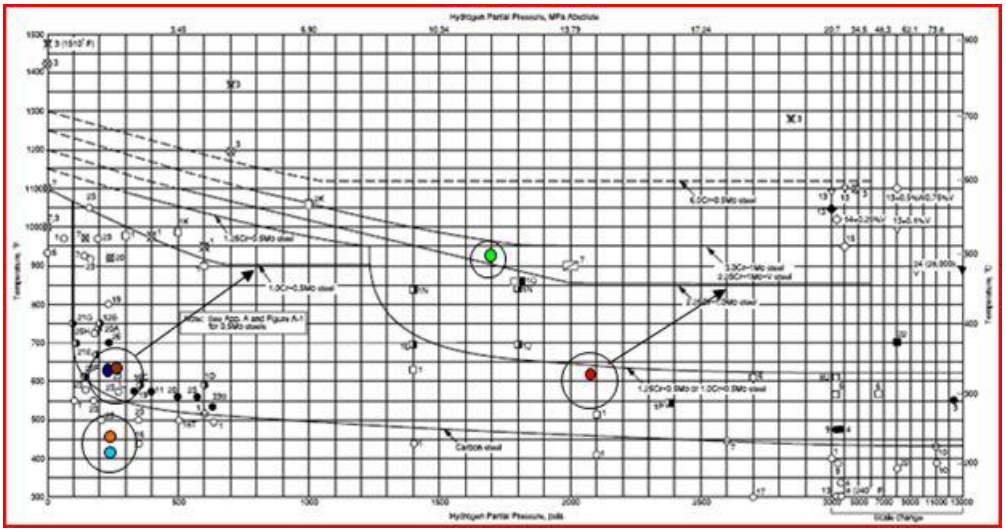


Fig. 10 – Curve di Nelson per verifica attacco da idrogeno ad alta temperatura

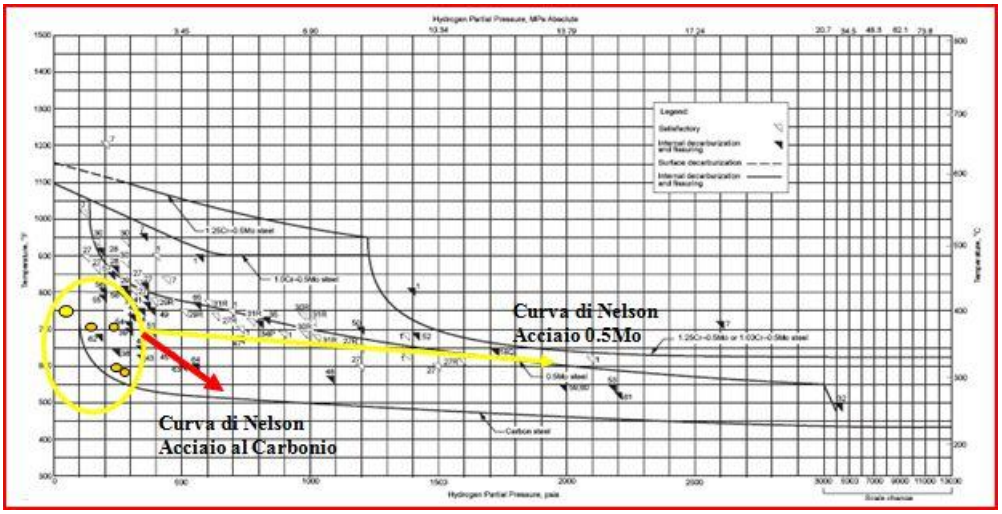


Fig. 11 – Curve di Nelson per verifica attacco da idrogeno ad alta temperatura per tubazioni in acciaio 0.5Mo

2.2.3. Tubazioni carbammato d'ammonio

Questo gruppo di linee comprende le linee in acciai austeno-ferritici e super austenitici del circuito di sintesi dell'impianto urea. La procedura adottata per la valutazione dello stato di conservazione ed efficienza è sostanzialmente la stessa vista precedentemente. I risultati delle ispezioni hanno mostrato però come questo sia il gruppo di linee sicuramente più compromesso.

Il carbammato d'ammonio è un composto intermedio per la sintesi dell'urea e risulta estremamente corrosivo ad alta temperatura, nonché tossico per la presenza di ammoniaca in forti percentuali. Inoltre, la corrosione da carbammato d'ammonio su acciai inossidabili austeno-ferritici e super austenitici è di tipo intergranulare e di difficile rilevazione se non quando siano già visibili forti riduzioni di spessore del materiale. Per valutare queste tubazioni, si è quindi eseguita una serie estesa di spessimetrie UT adottando come criterio di accettabilità il criterio "Half Life", HL, descritto in API570 sezione 7 [6]. Per ogni tubazione si è:

- Calcolata la Maximum Allowable Working Pressure, MAWP secondo l'equazione (2):

$$MAWP=(2*S*E*(t-2*LT*T))/D \qquad (2)$$

dove D è il diametro, S la tensione ammissibile, E il modulo di efficienza delle saldature, t lo spessore misurato, LT la velocità di corrosione, T il tempo;

- Determinato il tempo T per cui la MAWP sia minore della massima pressione di esercizio della linea. Questo intervallo di tempo è definito come "Half Life", HL della linea ed è il tempo entro cui metà della vita residua della linea si è consumato.

Secondo il criterio sopra definito, per 11 linee in acciaio SAF2205 su un totale di 96 linee del circuito, la "Half Life", HL è risultata minore di 2 anni. Queste tubazioni saranno quindi sostituite nella prossima fermata nel 2010 non garantendo affidabilità fino alla successiva fermata programmata del 2014.

2.2.4. Tubazioni vapore ad alta pressione

I meccanismi di danneggiamento attesi sono stati identificati con uno studio di corrosione su tutto il sistema vapore che non descriveremo in quest'articolo (RBI su tutta la sezione di generazione e distribuzione di vapore ad alta pressione).

Accenniamo solo alla verifica svolta sul danneggiamento da scorrimento viscoso. Questa è consistita nell'analisi delle tensioni per determinare la aree maggiormente "stressate", e, successivamente, in ispezioni mirate al rilevamento del danneggiamento in tali aree con: repliche metallografiche, durezza, misure dimensionali di diametro e spessori. In Fig. 12 si riporta l'individuazione dei punti soggetti a maggior tensione e quindi successivamente ispezionati di una linea vapore ad alta pressione.

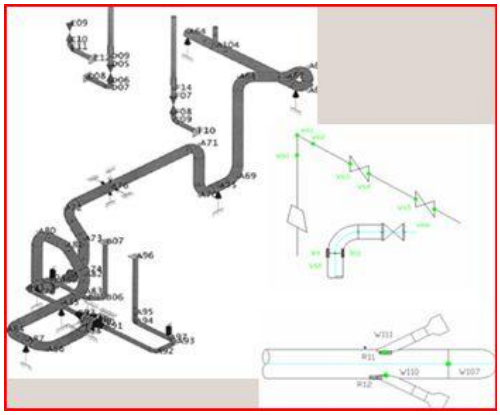


Fig. 12 – Tubazioni di vapore ad alta pressione: analisi delle tensioni e punti di ispezione

2.2.5. Altre tubazioni

Nel gruppo "altre tubazioni" sono state incluse tutte quelle contenenti fluidi non pericolosi e per le quali non siano stati identificati meccanismi di danneggiamento che richiedano tecniche ispettive particolari: ovvero linee soggette solo a corrosione uniforme interna, erosione, corrosione atmosferica. Per tutte queste tubazioni, fermo restando il lavoro della fase 1 svolto come per gli altri gruppi, è stato sviluppato un semplice piano ispettivo costituito da un'ispezione visiva esterna e spessimetrie UT a spot su ogni tubazione. Tali ispezioni sono state ovviamente estese in caso di indicazioni di danneggiamenti.

3. PIANO DI VERIFICHE ISPESL

La verifica del lavoro svolto consiste nell'applicazione di una procedura appositamente redatta da I.S.P.E.S.L. per la denuncia e la valutazione di tubazioni già esistenti alla data del 12/02/2005 e comunque commercializzati fino al 29/05/02 e non certificati PED, in accordo all'art. 16 del D.M.329/04.

Come detta il comma 2 dell'art. 16 del D.M.329/04, e come visto in Fig. 4, la denuncia dell'Utilizzatore al Dipartimento territoriale I.S.P.E.S.L. competente per luogo d'installazione contiene:

1. Una descrizione sintetica della tubazione o linea (impianto, identificazione, condizioni d'esercizio, fluido, dimensioni, accessori di sicurezza);
2. La classificazione dell'attrezzatura stessa secondo le tipologie di fluidi e le categorie previste dal Decreto Legislativo n°93/2000;
3. Una valutazione sullo stato di conservazione ed efficienza dell'attrezzatura stessa.

Il suddetto Dipartimento territoriale, al momento della registrazione della denuncia (singola o, come nel caso descritto in quest'articolo, multipla), assegna alla stessa un numero di protocollo, che resterà legato al numero identificativo di ciascuna linea contenuta nella denuncia stessa.

Nella fase preliminare riguardante l'Esame della Documentazione, presentata dall'Utilizzatore, il tecnico I.S.P.E.S.L. verifica la completezza e la pertinenza delle informazioni tecniche fornite, finalizzate ad un'esaustiva comprensione della documentazione stessa; inoltre, nel caso di denunce multiple, controlla la corretta categorizzazione dell'attrezzatura denunciata.

Entrando nel merito, è compito dell'I.S.P.E.S.L. constatare che la descrizione della singola attrezzatura (o più attrezzature) e la valutazione delle condizioni di ulteriore conservazione ed efficienza siano complete e che la denuncia contenga le dichiarazioni sulla possibilità di ulteriore esercizio in sicurezza delle attrezzature fino alla successiva verifica d'integrità delle stesse.

Visto il buon esito del suddetto esame documentale e previa comunicazione all'Utilizzatore, il Dipartimento territoriale I.S.P.E.S.L. competente per luogo d'installazione procede all'effettuazione di un sopralluogo presso l'Utilizzatore stesso. In tale sopralluogo, finalizzato ad accertare quanto dichiarato sulla denuncia delle attrezzature, vengono eseguite le seguenti verifiche:

- Individuazione delle attrezzature denunciate e delle loro condizioni d'esercizio;
- Controllo, a campione, della presenza delle documentazioni dichiarate nella denuncia;
- Identificazione e funzionalità degli accessori di sicurezza denunciati;
- Eventuale taratura degli accessori di sicurezza relativi alle attrezzature denunciate.

Relativamente alla condizione inerente l'identificazione e la funzionalità degli accessori di sicurezza, a protezione delle linee stesse, occorre fare una distinzione tra un Utilizzatore certificato con un sistema di gestione conforme al D.Lgs. 334/99 ed un Utilizzatore sprovvisto di qualsiasi sistema di gestione della sicurezza. Nel primo caso le suddette operazioni d'identificazione e rintracciabilità, nonché le tarature dei dispositivi di sicurezza stessi, possono effettuarsi attraverso un esame della documentazione, da individuarsi nel sistema di gestione della sicurezza ed a carico dell'Utilizzatore stesso. Nel secondo caso invece, i suddetti accertamenti, inerenti la funzionalità stessa, si effettuano mediante una verifica da effettuarsi direttamente in impianto.

In fase di sopralluogo non tutte le tubazioni vengono verificate. La percentuale di linee verificate da I.S.P.E.S.L. viene stabilita principalmente in base al meccanismo di danneggiamento atteso. Inoltre, la verifica viene eseguita per circuiti di tubazioni potenzialmente soggette agli stessi meccanismi di danneggiamento. Tali circuiti sono costituiti da linee "omogenee"

caratterizzate da vari parametri: fluido, stato fisico del fluido, temperatura, pressione, classe di linea. Molto utile in tal senso risulta la divisione in circuiti già effettuata con l'introduzione della Risk Based Inspection (vedi §4).

4. UN ULTERIORE PASSO IN AVANTI: RISK BASED INSPECTION E D.M.329

Dalla definizione riportata in API RP580 first edition, May 2002 [4], si legge che la Risk Based Inspection, RBI, altro non è che un processo di valutazione e gestione del rischio, dove il rischio è il prodotto figurato tra la probabilità che un evento accada e la conseguenza dell'evento stesso in termini di effetto sulla salute dell'uomo, sull'ambiente e di perdita economica. L'evento considerato è la perdita di fluido, verso l'esterno, da un componente di una unità di processo soggetto a pressione interna. La perdita è dovuta a danneggiamento in esercizio del componente stesso. Il rischio, così valutato, viene gestito in primo luogo attraverso l'ispezione del componente (con riduzione della probabilità di accadimento).

Perché fare un'analisi RBI? Si possono dare diverse risposte a questa domanda: per ridurre il livello generale di rischio delle unità produttive analizzate monitorando l'integrità strutturale componenti; per aumentare l'affidabilità dell'impianto; per aumentare la conoscenza e comprensione dei rischi correnti e quindi la capacità di accettare o non accettare il rischio stesso; per ottimizzare le tecniche e gli intervalli di ispezione con conseguente riduzione dei costi di manutenzione/ispezione, concentrando le risorse disponibili sugli apparecchi critici ed evitando perdite di tempo e soldi su apparecchiature a basso rischio; per disporre di argomenti validi e quantificabili da sottoporre alle Autorità di controllo per approvazione di piani ispettivi diversi da quanto previsto in D.M.329.

Senza entrare nei dettagli, la RBI è un processo dinamico in cui i risultati della valutazione del rischio e i conseguenti piani ispettivi vengono aggiornati ed ottimizzati ogni ciclo ispettivo (Fig.13).

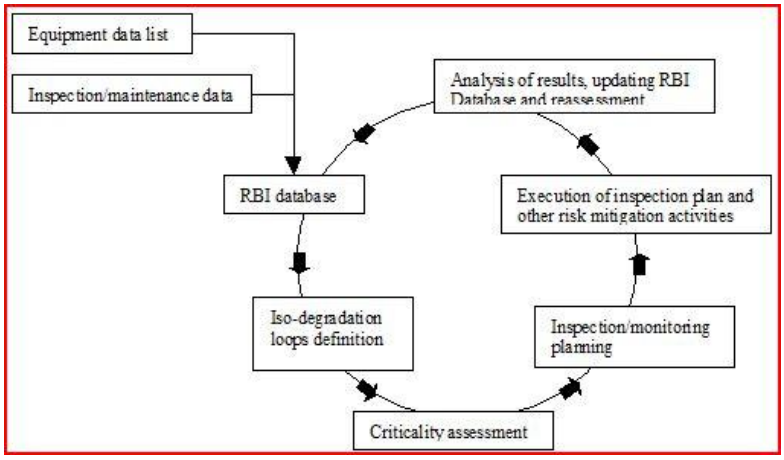


Fig. 13 – Fasi della metodologia RBI

La valutazione del rischio o criticità viene rappresentata secondo matrici di rischio (Fig. 14) che permettono in modo molto semplice ed intuitivo di discriminare tra componenti ad alto rischio e componenti a basso rischio.

Determinata la categoria di rischio, per ogni apparecchiatura (recipiente o tubazione) a pressione vengono generati i piani di ispezioni (secondo le raccomandazioni di metodo, estensione e frequenza contenute nei codici di ispezioni API) considerando i meccanismi di danneggiamento identificati nello studio di corrosione e la categoria di rischio (combinazione di conseguenza e probabilità di rottura) dell'apparecchiatura stessa.

La Risk Based Inspection è ormai una metodologia consolidata. Nella Fig. 15 viene illustrato come l'applicazione della RBI si sia ormai ampiamente diffusa in Europa.

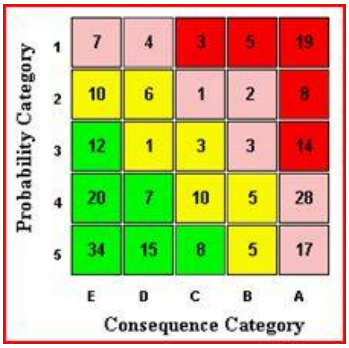


Fig. 14 – RBI, matrice di rischio

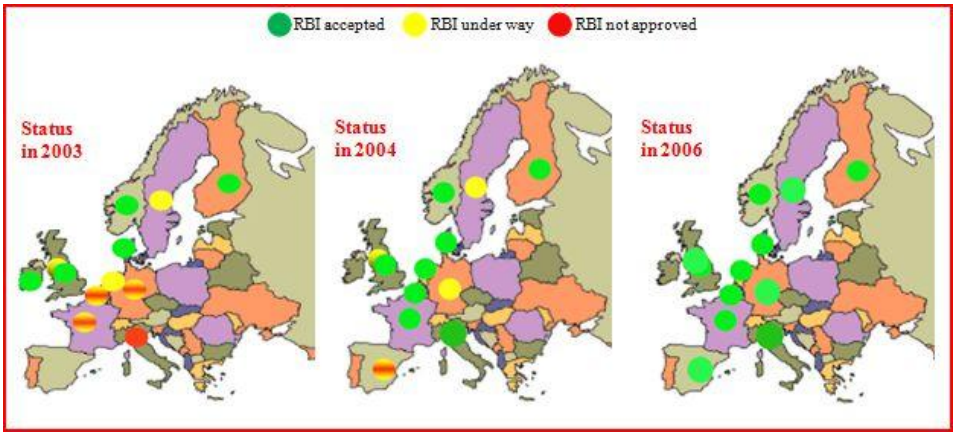


Fig. 15 – RBI, diffusione in Europa

Anche l'esperienza di RBI della Yara è enormemente cresciuta dal 2003 ad oggi: un programma di implementazione, tutt'ora in corso, coinvolge tutti i siti produttivi Yara sia in Europa (Italia, Francia, Germania, Norvegia. Finlandia, Olanda, Belgio) che in paesi extraeuropei (Trinidad, Qatar, Libia, Canada).

In particolare, il lavoro svolto a Ferrara per la denuncia delle tubazioni secondo il DM329 è stato estremamente importante per compiere un ulteriore passo per aumentare l'affidabilità e la sicurezza del sito. Disponendo di tutti i dati necessari all'implementazione della RBI anche per le linee, si sono definiti dei circuiti di tubazioni soggette agli stessi meccanismi di danneggiamento, raggruppandole per: condizioni operative e di processo simili (corrosione interna); materiali equivalenti (resistenza a corrosione); coibentati o non coibentati (corrosione esterna). Si è quindi determinata la categoria di rischio e si è sviluppato un piano di ispezione specifico per ogni circuito.

EquipmentID	System	Damage Mechanism	Method	Extent	Availability	Frequency
2N106	CR02 - NH3	External Deterioration	VI-Ext	100% Coverage	OnLine	5
2N106	CR02 - NH3	CUI	Profile RT	50% of potential CUI Locations by category. (Date In Service was used as last inspection date.)	OnLine	5
2N106	CR02 - NH3	Brittle Fracture	Check impact test properties on original material certificates	Brittle Fracture expected on Circuit - consult with Materials Engineer.	OnLine	5

Fig. 16 – RBI, piano di ispezione per gruppo di tubazioni ammoniaca: ispezione ogni 5 anni

Nella Fig. 16 si riporta il piano di ispezione per il circuito di linee ammoniaca nell'impianto Urea dello stabilimento Yara di Ferrara: si può notare come con la metodologia RBI si raccomanda un piano di ispezione di dettaglio, più esteso e con frequenze maggiori di quanto prescritto dal D.M.329. Ancora una volta si ribadisce il concetto che i requisiti dettati dal D.M.329 sono solo i minimi da rispettare e che non sono sempre sufficienti a garantire l'affidabilità e la sicurezza degli impianti di produzione.

5. CONCLUSIONI

Le novità poste dall'entrata in vigore del D.M.329, descritte sinteticamente nel §1 di quest'articolo, sono sembrate in un primo momento impossibili da affrontare: in prima battuta, l'Utilizzatore si è trovato di fronte ad una legge ingiustamente gravosa, che richiedeva una mole enorme di lavoro ponendo vincoli sulla continuità di esercizio economicamente non sostenibili. Tuttavia, dopo aver adottato l'approccio descritto nel presente articolo, possiamo affermare l'opposto di quanto pensato alla data di uscita del Decreto: il D.M.329 è una "buona legge" in linea con il modello del "New Approach" delle Direttive Europee basate sul concetto di piena responsabilità dell'Utilizzatore e non sulla conformità ad un modello prestabilito dalle Autorità che non tenga in considerazione le specificità dei diversi impianti. Una piena responsabilità diventa un forte stimolo al miglioramento delle conoscenze tecniche ed organizzative impiantistiche e quindi all'applicazione sistematica di un metodo di lavoro teso ad aumentare l'affidabilità e la sicurezza degli impianti.

In quest'ottica, il Decreto sancisce solo dei requisiti minimi: questi ultimi non sempre sono sufficienti a garantire un adeguato livello di affidabilità e sicurezza ed in particolar modo qualora si parli di ispezione e manutenzione di impianti potenzialmente molto pericolosi.

Il D.M.329 apre inoltre la strada a metodologie di lavoro dagli indubbi benefici e già ampiamente consolidate nel resto d'Europa come la Risk Based Inspection. Utilizzando la RBI nel contesto del D.M.329 è possibile infatti accrescere la conoscenza delle reali condizioni degli impianti con maggior consapevolezza dei rischi reali e quindi con un miglioramento generale del livello di sicurezza e di affidabilità degli impianti stessi concentrando le ispezioni laddove il rischio è più alto. Introducendo l'art.10 comma 5, la RBI si presta inoltre come strumento preferenziale per eventuali richieste di approvazione di piani ispettivi differenti da quanto elencato nelle tabelle allegate al D.M.329, che, come detto, non sempre è compatibile con le esigenze di un impianto a ciclo continuo.

6. BIBLIOGRAFIA

1. D.M. 1 dicembre 2004, n. 329, Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del D.Lgs. 25 febbraio 2000, n. 93
2. Yara RBMI Guidelines
3. API RP 571, FIRST EDITION, DECEMBER 2003, Damage mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry
4. API RP 580, FIRST EDITION, MAY 2002, Risk-based Inspection
5. API RP 581 SECOND EDITION, SEPTEMBER 2008
6. API 570, Piping Inspection Code, Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-service Piping Systems SECOND EDITION, OCTOBER 1998, ADDENDUM 1, FEBRUARY 2000, ADDENDUM 2, DECEMBER 2001, ADDENDUM 3, AUGUST 2003
7. API RP 574, Inspection Practices for Piping System Components SECOND EDITION, JUNE 1998
8. API 579-1/ASME FFS-1, JUNE 5, 2007 (API 579 SECOND EDITION)
9. API RP 941, SIXTH EDITION, MARCH 2004, Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants
10. ISPESL, Circolare n. 48/2003 del 5.12.2003
11. ISPESL, Linea Guida per le valutazione di vita residua per componenti in regime di scorrimento viscoso. Indicazioni per l'applicazione della circolare n. 48/2003 del 5.12.2003
12. Studio HAZOP Yara Ferrara

sessione POSTER

10
Metodologie di indagine microstrutturale per la valutazione del danno da scorrimento viscoso su acciai per impiego ad alta temperatura

A. Alvino - F. Ciuffa* - D. Lega**

*D. Ramires***

**ISPESL - DTS Laboratorio Chimico e Tecnologico dei Materiali*
***ISPESL - DIL Laboratorio Polveri e Fibre*

SOMMARIO

L'impiego di acciai ad elevate temperature, i loro meccanismi di danno e le tecniche di indagine per la caratterizzazione dell'evoluzione microstrutturale sono oggetto di numerose ed approfondite ricerche scientifiche. La valutazione del danneggiamento a seguito dell'esercizio in regime di scorrimento viscoso passa attraverso l'osservazione dell'evoluzione microstrutturale che avviene principalmente mediante fenomeni di coalescenza di fasi già presenti, nucleazione e crescita di seconde fasi, microvuoti e microcricche. Le tecniche di analisi tradizionalmente seguite in microscopia ottica ed elettronica costituiscono uno strumento di indagine valido ed efficace, ma non sempre in grado di identificare tutti i fenomeni associati al danneggiamento per scorrimento viscoso dei nuovi materiali per impiego a più alta temperatura. In questa memoria viene presentato uno studio sulle opportunità offerte dall'applicazione sinergica delle tecniche DTA, DTA-EGA, e DRX per l'identificazione qualitativa delle seconde fasi presenti in acciai eserciti, previo isolamento delle stesse mediante dissoluzione della matrice.

1. INTRODUZIONE

La maggior parte delle teorie e delle indagini sperimentali per la valutazione del danno da creep sono state sviluppate per le leghe ferrose. La precedente generazione di impianti di produzione dell'energia elettrica ha impiegato prevalentemente acciai ferritici Cr-Mo eserciti ad alta temperatura e soggetti a valutazione periodica di integrità strutturale e di vita residua. Il danneggiamento strutturale da creep in questi acciai si manifesta attraverso la cavitazione, cioè la nucleazione e crescita di microvuoti al bordo grano, che poi coalescono fino ad arrivare alla formazione di microcricche. Le tecniche di indagine per valutare l'ulteriore esercibilità di questi acciai Cr-Mo sono le Prove non Distruttive (PnD) e l'osservazione al microscopio ottico e/o elettronico di repliche metallografiche. Più complessa ed assai meno nota è la risposta di acciai per impieghi ad alta temperatura e delle leghe ingegneristiche, quali le leghe di Al, Mg, le super leghe di Ni, i materiali compositi metallo-matrice. Nelle leghe strutturali il comportamento a creep è governato da tutta una serie di fenomeni microstrutturali quali la precipitazione, l'accrescimento competitivo, la dissoluzione di particelle di seconde fasi, che rendono più difficile e più specifica della tipologia di lega la correlazione tra l'evoluzione microstrutturale e la risposta meccanica. Tuttavia in generale la quantità, la dimensione e la distribuzione dei precipitati ha dei precisi effetti sulle proprietà meccaniche.

Non sempre i metodi microscopici sono completamente soddisfacenti per l'identificazione di tutte le fasi presenti. In questa memoria vengono presentati alcuni metodi microanalitici volti all'identificazione della quantità, delle dimensioni e della distribuzione dei precipitati presenti

negli acciai in regime di scorrimento viscoso. In particolare verranno trattate le tecniche di analisi dei precipitati, previa dissoluzione della matrice, mediante analisi termica differenziale, analisi termica differenziale accoppiata ad analisi dei gas evoluti, diffrazione a raggi X.

2. PROBLEMATICHE ANALITICHE CONNESSE ALLA DISSOLUZIONE DELLA MATRICE

L'analisi delle seconde fasi richiede l'isolamento delle stesse dalla matrice mediante dissoluzione chimica o elettrochimica del campione e successiva filtrazione del residuo insolubile [1]. I metodi elettrochimici, sono versatili, affidabili e di largo impiego, nell'analisi di fasi intermetalliche ma possono presentare dei problemi con carburi e nitruri, in quanto se corrente, voltaggio ed ambiente chimico non sono strettamente controllati si può avere una parziale decomposizione dei carburi con conseguenti errori di quantificazione (perdita di materiale) e perdita di informazioni microstrutturali.

In virtù di questo, per l'estrazione dei carburi, nitruri e carbonitruri, che sono fasi particolarmente importanti nei fenomeni di danneggiamento per scorrimento viscoso degli acciai, è preferibile ricorrere ad un isolamento mediante dissoluzione chimica della matrice. Tra i vari reattivi che è possibile impiegare, si annoverano varie miscele di acidi minerali, ma probabilmente uno dei più versatili è quello ideato da Berzelius e poi modificato da Meineke, consistente in una soluzione a base di KCl, CuCl2 ed HCl, in grado di solubilizzare completamente un gran numero di leghe metalliche, tra cui la quasi totalità degli acciai e delle leghe di nichel [2].

Sono state condotte delle prove analitiche di estrazione chimica con questo reattivo su diverse tipologie di acciai, da quelli ad alto tenore di nichel e cromo (HP DIN G-X 40 NiCrSiNb 35 25) fino ai più comuni acciai ferritici basso legati. Il metodo è semplice, preciso e ripetibile.

3. ANALISI IN DTA, DSC E DTA/EGA DELLE FASI ESTRATTE

L'analisi termica differenziale DTA e la calorimetria a scansione differenziale DSC sono tecniche analitiche in cui la temperatura di un composto è misurata rispetto alla temperatura di una sostanza termicamente inerte, mentre entrambi sono soggetti ad un programma controllato di temperatura. In un termogramma DTA sull'asse delle ordinate viene riportata la differenza tra la T del campione e la T di un riferimento inerte, mentre sull'asse delle ascisse si trovano la temperatura o il tempo. Se il campione subisce una reazione di ossidazione, riduzione, una transizione di fase od una decomposizione c'è una variazione fra la sua temperatura rispetto a quella del riferimento che si manifesta nel termogramma con un picco o con una variazione di pendenza della linea di base. Nella calorimetria a flusso differenziale DSC, in relazione ad una particolare configurazione geometrica della testa di misura, la differenza di temperatura tra il campione ed il riferimento inerte corrisponde ad un flusso di calore: ciò rende tale tecnica più adatta a misure di entalpia di reazione e capacità termica. Si tratta di tecniche analitiche molto sensibili che consentono di lavorare con pochi mg di campione in atmosfere dinamiche o statiche, ossidanti (aria/aria arricchita di O2) o inerti (N2, He) [3].

Le seconde fasi comunemente presenti negli acciai quali i carburi, i nitruri ed i solfuri in presenza di ossigeno danno luogo ad una reazione di decomposizione e di combustione, sviluppando rispettivamente diossido di carbonio, azoto elementare, e diossido di zolfo entro intervalli di temperatura specifici che sono funzione della stechiometria del composto. Tale reazione è esotermica e viene registrata come un picco di forma e temperatura assegnata in un termogramma DTA/DSC. Le metodiche DTA/DSC consentono quindi, in linea di principio, di individuare e quantificare questa tipologia di seconde fasi, come pure di identificare con precisione la loro composizione e, nel caso di composti molto simili tra loro, persino di discriminare tra stechiometrie affini.

La tecnica accoppiata DTA/EGA consente una migliore risoluzione dei picchi ed è più adatta ad una analisi quantitativa. L'apparato sperimentale consiste in un forno DTA accoppiato ad un analizzatore dei gas evoluti, che può essere un analizzatore di massa o un rivelatore infrarosso in trasformata di Fourier, il tracciato contiene sia il segnale derivante dall'analisi termica differenziale che il segnale proveniente dai gas sviluppati. Quest'ultimo segnale essendo relativo

ai soli prodotti della combustione ha una forma gaussiana che rende più facili le eventuali deconvoluzioni.

Si tratta di tecniche analitiche molto sensibili e quindi estremamente vantaggiose, che consentono di lavorare con pochi mg di campione e di identificare fasi al di sotto del 5 % in peso, a differenza di altre tecniche (come ad esempio la diffrazione di raggi X) che richiedono quantitativi di campione più elevati. Sfortunatamente, le temperature di decomposizione e combustione osservate possono subire apprezzabili oscillazioni in funzione del diametro delle particelle e dalle interazioni presenti fra i costituenti del campione stesso, limitando la praticità e l'affidabilità del metodo. In un tracciato DTA è inoltre teoricamente possibile seguire l'andamento del rapporto stechiometrico Cr/Fe nei carburi, che nei fenomeni di scorrimento viscoso è generalmente legato all'avanzare del danneggiamento. La stechiometria del composto infatti influenza notevolmente la temperatura di decomposizione e combustione del carburo stesso. Bisogna comunque tenere presente quanto accennato prima in merito al diametro delle particelle studiate: è infatti noto che per tutte le reazioni in cui sono presenti fenomeni di superficie, come appunto è il caso di ossidazioni e combustioni, la posizione e la forma del picco è influenzata dal diametro delle particelle del campione. Studi sistematici condotti sulle T di decomposizione ed ossidazione dei nitruri hanno ad esempio mostrato differenze dell'ordine del centinaio di gradi per granulometrie variabili di poche decine di micron. Questi fenomeni rendono dunque incerta e non sempre affidabile l'assegnazione dei picchi sulla sola base di risultati ottenuti con standard commerciali, anche qualora fosse possibile disporre, per uno stesso standard, di campioni di differenti granulometrie [4-6].

I termogrammi presentati in questa memoria sono ottenuti con una apparecchiatura per analisi termica differenziale a flusso di calore DSC Netzsch 404, intervallo di T 25°C-1500°C, dotata di una fornace in Pt10%Rh-Pt e di una termocoppia di tipo S in Pt10%Rh-Pt. Le misure sono state effettuate in aria statica su crogioli piatti di allumina da 80 Ql, contenenti un quantitativo di polvere estratta compreso fra 5 e 10 mg, con un programma termico da 25°C a 1500°C ed una velocità di riscaldamento di 10K/min.

Sono state effettuate delle prove su un acciaio HP 35 25 Ni Cr, per impieghi ad alte temperature, dopo 85.000 h di esercizio in un impianto petrolchimico di reforming (campione n. 1) ed un materiale di analoga composizione non esercito (campione n. 2). Il profilo del tracciato è ripetitivo e la combustione è completa.

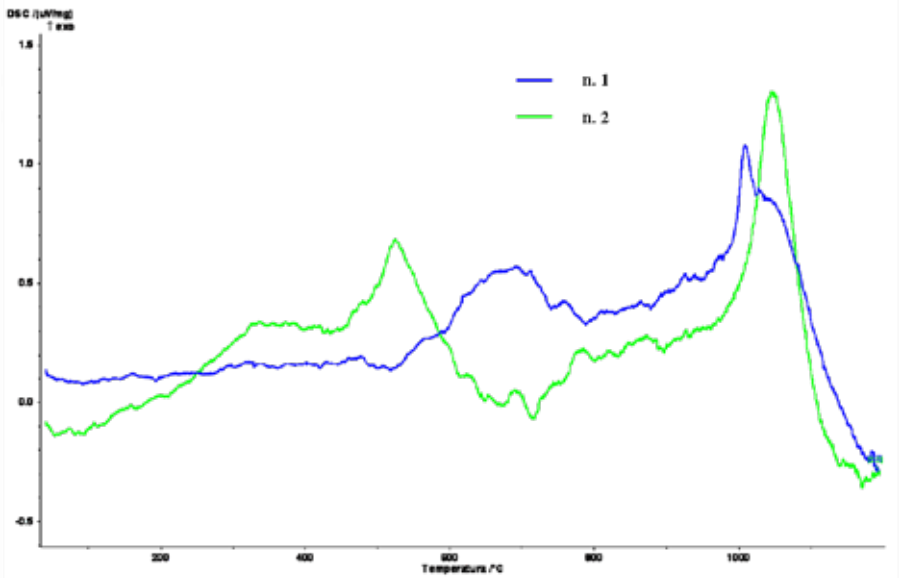


Figura 1 : Profili DSC in riscaldamento a 10K/min del campione n.1 (acciaio HP 3525 NiCr esercito) e del campione n.2 (acciaio HP 3525 NiCr non esercito)

Dal tracciato ottenuto in DSC è possibile effettuare un dosaggio quantitativo delle fasi presenti solo se se è nota l'entalpia molare di reazione, una tecnica più opportuna per seguire il rapporto quantitativo delle fasi è la tecnica accoppiata DTA/EGA che tra l'altro consente anche una migliore risoluzione dei picchi.

Nel caso dell'analisi delle seconde fasi presenti negli acciai in generale è possibile separare meglio il segnale proveniente dall'EGA nelle singole componenti mediante tecniche di deconvoluzione in relazione alla forma gaussiana del picco rispetto al segnale registrato dal termogramma, ciò non solo semplifica l'identificazione della fasi presenti ma ne consente la definizione quantitativa.

In generale l'identificazione delle fasi presenti tramite soltanto l'applicazione delle tecniche DTA, DSC o DTA/EGA è discutibile. Stechiometrie diverse non sempre conducono a cambiamenti significativi nella temperatura di combustione e ciò può portare a delle assegnazioni errate. Inoltre le temperature di combustione subiscono delle variazioni in relazione al diametro delle particelle. È noto che per carburi del tipo $M_{23}C_6$ una precipitazione massiva comporta una significativa variazione delle temperature di combustione in relazione al diametro ed allo stato di aggregazione delle particelle. Particolare cura ed attenzione deve essere dedicata alla fase di estrazione, l'eventuale presenza di larghe quantità di C amorfo, derivante dalla parziale decomposizione dei carburi, può comportare l'insorgere di fenomeni di precombustione che rendono difficile l'identificazione e l'assegnazione dei picchi. È opportuno quindi ricorrere sempre anche all'analisi mediante DRX.

4. ANALISI IN DRX DELLE FASI ESTRATTE

La diffrazione di raggi X da polveri (XRPD) consente l'identificazione qualitativa e quantitativa delle fasi, presenti in una polvere o in un campione massivo, aventi struttura cristallina.

Il fenomeno della diffrazione dei raggi X ad opera dei cristalli deriva da un processo di interazione tra la radiazione elettromagnetica e la materia. Ogni elettrone di ogni atomo del campione diventa centro diffusore secondario di raggi X della stessa λ del fascio incidente. I cristalli diffrangono i raggi X perché la loro λ è dello stesso ordine di grandezza rispetto alle distanze interatomiche e periodicità tipiche della struttura cristallina.

L'interferenza tra le onde diffratte da ogni elettrone risulta costruttiva solo nelle direzioni in cui le onde diffuse da tutti gli atomi appartenenti allo stesso reticolo cristallino sono in coincidenza di fase. Le condizioni geometriche che garantiscono l'interferenza costruttiva sono espresse dalla legge di Bragg (1).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \qquad (1)$$

dove: d è la distanza interplanare dei piani cristallografici
λ è la lunghezza d'onda dei raggi X utilizzati
θ è l'angolo compreso tra il fascio incidente e i piani del reticolo

Ogni diffrattogramma è caratterizzato da una combinazione di posizione ed intensità dei picchi caratteristica delle fasi presenti. Quindi, ogni composto cristallino presenta una sua "impronta digitale", che consente l'utilizzo della diffrazione da polveri come strumento di identificazione. Ciò è dovuto al fatto che ogni sostanza cristallina ha un suo insieme di distanze interplanari (d) dovuto alle dimensioni, alla forma e alla simmetria della sua cella elementare.

L'identificazione della composizione delle fasi di un campione sconosciuto mediante XRPD è solitamente basata sul confronto visivo o assistito dal computer di una porzione del suo diffrattogramma di polvere a raggi X con il diffrattogramma sperimentale o calcolato di un materiale di riferimento. Il database più completo a fini identificativi per la diffrazione da polveri, è il database PDF2 (PDF significa Powder Diffraction File), pubblicato dall'International Centre for Diffraction Data (ICDD), una organizzazione senza scopo di lucro che ha lo scopo di collezionare, pubblicare e distribuire dati di diffrazione da polveri per l'identificazione di materiali cristallini [7].

I diffrattogrammi presentati in questa memoria sono stati ottenuti sugli stessi residui estratti analizzati in DSC. Il campione, disperso in acqua e depositato su filtro di Ag, è stato analizzato mediante diffrattometria a raggi X, utilizzando un diffrattometro con configurazione θ–θ, modello X'PERT PRO della PANalytical dotato di rivelatore X'Celerator.

Le condizioni strumentali sono state le seguenti: tensione di acquisizione 40KV, intensità di acquisizione 40 mA, tubo generatore di raggi X dotato di anticatodo in rame, portacampioni rotante, passo di acquisizione (2θ) 0.02, tempo di acquisizione per passo 80s.

Le assegnazioni dei picchi sono state effettuate per confronto manuale con gli spettri DRX ottenuti da De Almeida Soares [8] per la stessa tipologia di acciaio invecchiato in forno e non invecchiato, nelle stesse condizioni operative e con la stessa metodica di estrazione.

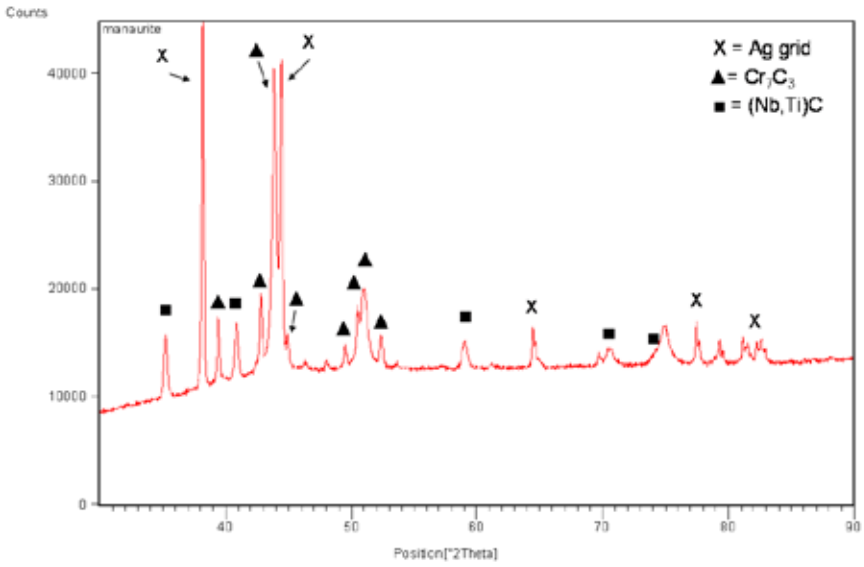


Figura 2 : Pattern di diffrazione dei residui estratti dal campione n. 2 (acciaio HP 3525 NiCr non esercito)

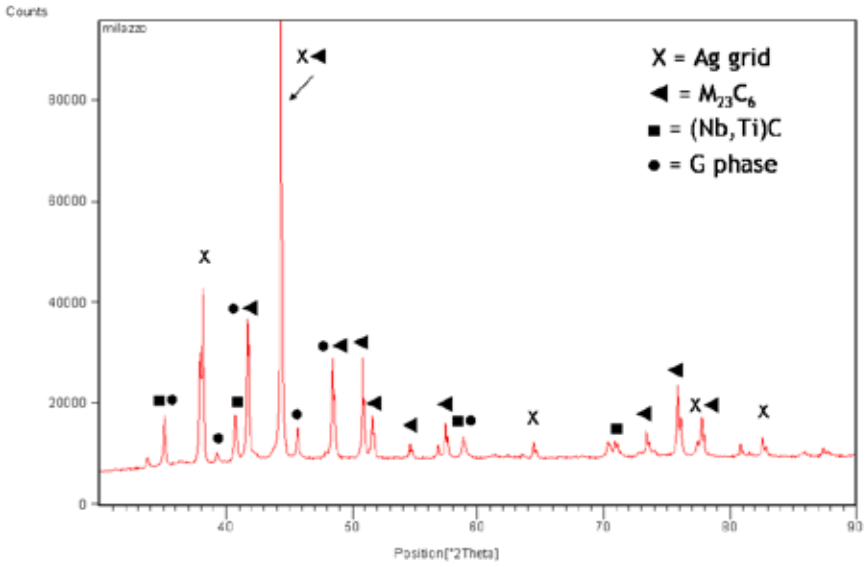


Figura 3 : Pattern di diffrazione dei residui estratti dal campione n. 1 (acciaio HP 3525 NiCr esercito)

5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

L'analisi in diffrazione a raggi X rileva la presenza nel materiale non esercito delle seguenti fasi: carburi di cromo del tipo Cr7C3 e carburi di Nb e Ti. L'analisi del tracciato DTA mostra un picco molto ben definito con una T onset di 1000°C, ed una T end di 1100°C compatibile con la decomposizione e combustione dei carburi più stabili di Nb e Ti, ed un picco dalla forma complessa fra 450°C e 600°C che può corrispondere ai carburi di Cr del tipo Cr7C3. La complessità del picco può anche essere legata a variazioni del diametro particellare. Nel materiale esercito il DRX rileva la presenza di carburi di Cr a stechiometria mista del tipo M23C6 con M=Fe/Cr, la presenza di carburi di Nb, e di una nuova fase identificata come G phase. Il tracciato DTA è completamente diverso rispetto al materiale non esercito. Sono presenti due picchi complessi, uno con una T onset di circa 600°C ed una T end di circa 800°C che potrebbe derivare dalla decomposizione e combustione di carburi a stechiometria mista, ricchi in Cr, del tipo M23C6 , ed un secondo picco a più alta temperatura che mostra l'attenuazione del segnale relativo ai carburi di Nb e Ti a favore di una nuova fase con T di decomposizione vicina, probabilmente identificabile con la G phases.

Le tecniche di analisi termica hanno una promettente capacità di riconoscimento delle fasi, tuttavia le assegnazioni e le identificazioni sono comunque soggette a confusione in relazione all'influenza concomitante del diametro delle particelle ed alla impossibilità di avere conferma da altre tecniche. Tali tecniche invece unite alla diffrazione rendono più chiara l'evoluzione microstrutturale e le complessità associate.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il sig. Antonio Di Loreto per il prezioso supporto tecnico.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Thomas R. Dulski, A Manual for the Chemical Analysis of Metals, ASTM International.

[2] Keith E. Burke, Chemical extraction of refractory inclusions from iron and nickel based alloy, Metallography, vol. 8, 6 (1975), pag. 473-488

[3] M. Brown, Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications, Kluwer Academic Press.

[4] W. R. Bandi Second phases in steel, Science vol. 196, aprile 1977, pag 136-142

[5] W. R. Bandi and G. Krapf, Differential thermal analysis - Evolved gas analysis for the determination of carbide and nitride phases in steel, Analytical Chemistry, vol. 49, 4 (1977), pag. 649-654

[6] MH Lloyd, C.E. Shanahas, Identification of nitride inclusions in steel using differential thermal analysis and evolved gas analysis, Journal of Thermal Analysis, vol. 12, 1977, pag. 321-334

[7] ASM Handbook Volume 10, Materials Characterization.

[8] De Almeida et al., Niobium addition in HP heat resistant cast stainless steel, Materials Characterization, 29, 1992, pag. 387-396

sessione POSTER

11
Illustrazione della Procedura di Hauptmanns

*N. Palumbo**

*G. Gurnari***

* *ISPESL Dipartimento di BRESCIA*
** *ISPESL Dipartimento di UDINE*

SOMMARIO

In questa memoria si presenta il metodo proposto da Hauptmanns per calcolare le traiettorie di missili provenienti da recipienti cilindrici installati orizzontalmente, utilizzando le soluzioni analitiche delle equazioni del moto. I principali coefficienti di queste equazioni, p.e. il drag e l'energia dei frammenti, sono di tipo stocastico e quindi sono variabili rappresentate da funzioni statistiche, i cui parametri sono determinati per quanto possibile da risultati sperimentali o da incidenti accaduti. L'incertezza dei coefficienti suddetti è valutata con il metodo Monte Carlo. Le soluzioni numeriche delle equazioni del moto sono confrontate con casi realmente accaduti.

1. INTRODUZIONE

Nella maggior parte degli impianti industriali vi sono tubazioni e recipienti contenenti gas ad alta pressione o liquidi surriscaldati. Essi sono sistemi chiusi e la loro esplosione può produrre la frammentazione del contenitore e quindi la generazione di missili. Questi ultimi possono causare, direttamente, infortuni alle persone e/o danni alle strutture e, in modo indiretto, possono aumentare gli effetti di un incidente distruggendo o danneggiando le attrezzature di processo circostanti, potendo in tal modo dare origine ad un ulteriore incidente (effetto domino).

La presente trattazione è una estensione della procedura già proposta dallo stesso Hauptmanns [8] per lo scoppio di recipienti sferici. Con riferimento a resoconti di incidenti che comportano scoppi e frammentazioni, forniti da Baker e altri [2] e da Lees [11] e, più dettagliatamente, da Pietersen [12], lo studio tratta l'analisi del lancio e delle traiettorie dei frammenti che si originano dallo scoppio di recipienti cilindrici installati orizzontalmente e riempiti di gas in pressione, come per esempio è il caso dei serbatoi di GPL.

L'energia di esplosione liberata nello scoppio di un recipiente è funzione della sua pressione interna che a sua volta dipende dalla modalità di rottura del recipiente stesso. Quanto maggiore è tale pressione, tanto più intensa sarà l'esplosione. Le cause dello scoppio di un recipiente possono essere:

- la sovrappressione (p.e. dovuta al sovrariempimento o al riscaldamento, in combinazione con il mancato intervento della valvola di sicurezza),
- il cedimento strutturale (p.e. dovuto a difetti di costruzione o all'indebolimento delle membrature, causati da fragilità, corrosione, etc.),
- il coinvolgimento in un incendio.

In ciò che segue, quindi, si illustra un metodo proposto da Hauptmanns [9] per calcolare le traiettorie dei missili e le energie di impatto derivanti dall'esplosione di recipienti a pressione come sopra descritti. Contrariamente a precedenti procedure (cfr. Baker e altri, [2]), il metodo

tiene conto della natura stocastica o della incertezza della maggior parte delle variabili di input. Quindi, risulta possibile elaborare le informazioni, ottenute dagli esperimenti o dagli incidenti accaduti, più verosimilmente che con un modello tradizionale. Qui viene trattato solo il caso del cedimento di recipienti contenenti un liquido surriscaldato sotto pressione (p.e. GPL), mentre nel caso di gas in pressione possono essere utilizzati i metodi per calcolare l'energia di espansione studiati da Hauptmanns [8] e da CCPS [1], rimanendo invariato il resto del metodo.

L'applicazione della procedura, che è stata implementata da Hauptmanns [9] nel programma per computer denominato MISSC, consente altresì di progettare misure di protezione contro i missili e di predisporre il layout di uno stabilimento in modo tale che l'impatto di un missile sulle attrezzature adiacenti o nelle vicinanze divenga improbabile.

2. METODOLOGIA

2.1. Equazioni Fondamentali e Loro Coefficienti

La traiettoria di un missile è calcolata in due dimensioni, considerando la resistenza dell'aria proporzionale al quadrato della sua velocità. Questa assunzione equivale alla applicazione del cosiddetto intervallo balistico che varia da velocità molto basse, per le quali la resistenza è proporzionale alla velocità stessa, a valori di velocità supersoniche per le quali la resistenza è una funzione complessa. Nell'ipotesi che i frammenti che si dipartono dallo scoppio di un recipiente abbiano velocità contenute solitamente nel range balistico, le equazioni del moto sono (cfr. Lees [11]):

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\rho \cdot C_D \cdot A_D}{2 \cdot m} \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} \pm \frac{\rho \cdot \left(C_D \cdot A_D \mp C_L \cdot A_L\right)}{2 \cdot m} \cdot \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + g = 0 \qquad (2)$$

I simboli nelle equazioni (1) e (2) hanno i seguenti significati: *x*, direzione orizzontale; *y*, direzione verticale; *m*, massa del frammento; C_D, coefficiente di drag (resistenza); A_D, area di drag (sezione verticale), C_L, coefficiente di lift (portanza); A_L, area di lift (sezione orizzontale); ρ, densità dell'aria; *g* accelerazione di gravità.

Una soluzione analitica delle due equazioni differenziali non lineari di cui sopra costituisce la base della procedura di Hauptmanns. (cfr. Appendice A). Nell'equazione (2) la presenza del simbolo ± è dovuta al verso delle forze di drag e di lift.

Le grandezze necessarie all'applicazione delle equazioni (1) e (2) ai casi concreti sono le seguenti:

- pressione di rottura,
- energia contenuta nel recipiente nell'istante di rottura,
- grado di riempimento del recipiente all'inizio dell'incidente nel caso di liquidi surriscaldati,
- percentuale di energia iniziale impartita ai frammenti,
- numero di frammenti,
- forma e massa dei frammenti (p.e. appuntiti o arrotondati),
- percentuale di energia iniziale impartita al singolo frammento,
- orientamento della traiettoria (azimut e angolo polare di tiro),
- coefficiente di drag,
- coefficiente di lift,
- area di drag,
- area di lift,
- direzione e velocità del vento durante l'incidente.

Le quantità sopra elencate possono essere di natura stocastica (p.e. massa dei frammenti) oppure non conosciute con certezza (p.e. pressione di rottura) e vengono trattate come variabili aleatorie indipendenti, descritte da distribuzioni di probabilità le cui funzioni di densità di probabilità sono rappresentate dalle equazioni da (A7) ad (A10), richiamate in Appendice A. La scelta dei parametri di queste distribuzioni è giustificata dalle considerazioni riportate nei seguenti sottoparagrafi.

2.2. Fattori che Influenzano la Traiettoria dei Missili

2.2.1. Velocità Iniziale dei Frammenti

La velocità iniziale di un frammento è ottenuta da:

$$v_0 = \left(\frac{2 \cdot E_k}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

Nell'equazione (3), E_k è l'energia cinetica impartita al frammento, m la sua massa e v_0 la velocità iniziale. Si perviene alla determinazione di E_k solo dopo aver calcolato l'energia contenuta nel recipiente.

L'energia iniziale di un liquido surriscaldato contenuto in un recipiente è calcolata per mezzo della procedura esposta in CCPS [1] che si basa sulla valutazione termodinamica della differenza di energia interna tra lo stato iniziale e lo stato espanso. Inoltre, viene considerata la possibilità che, data la pressione e la temperatura iniziali e il tipo di sostanza, l'evaporazione della fase liquida contribuisca alla energia di esplosione o meno. Analoga procedura può essere adottata se un gas non si comporta idealmente, come nel caso di pressione molto elevata. La pressione di rottura dipende dallo scenario nel quale la stessa rottura si può verificare . Nel caso di rottura per sovrappressione, si dovrebbe utilizzare la pressione di rottura del recipiente, ossia la sua massima pressione di esercizio moltiplicata per un fattore di sicurezza. Nel caso di rottura meccanica, la pressione adottata dovrebbe essere quella di normale esercizio. Nel caso di incendio, il CCPS [1] raccomanda un valore di 1,21 volte la pressione di inizio scarico della valvola di sicurezza. In ogni caso, non potendo essere conosciuta con certezza la pressione nell'istante in cui si verifica l'incidente, si assume che essa sia compresa tra il 90% e il 110% dei valori sopra indicati e viene rappresentata dalla funzione di densità di probabilità costante della Eq. (A7).

Il contenuto di energia del recipiente al momento della sua esplosione E, è impiegato per l'espansione stessa della sostanza, per la rottura del recipiente, per l'onda d'urto e per la proiezione di frammenti. Pertanto, solo una parte dell'energia di esplosione si trasforma in energia cinetica dei frammenti (E_k) che può essere ottenuta moltiplicando l'energia totale E per un fattore che varia tra 0,2 e 0,5, con 0,2 valore raccomandato (CCPS [1]). L'orientamento a preferire il valore 0,2 è giustificato da una distribuzione di probabilità a triangolo rettangolo, nell'intervallo 0,2 ÷ 0,5, con valore atteso pari a 0,3 (cfr. Eq. (A8)).

Le velocità iniziali di varie tipologie di frammenti originati dallo scoppio di recipienti cilindrici sono state esaminate da Baum ([3], [4], [5], [6]) sia teoricamente che sperimentalmente. In particolare, in Baum [3] sono stati trattati missili proiettati da un recipiente a causa

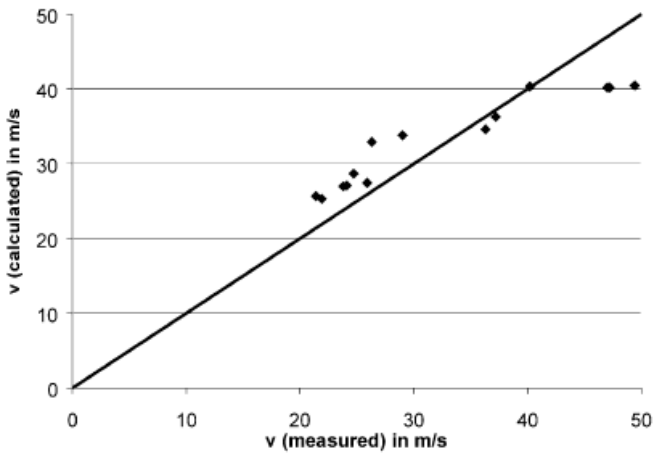


Fig. 1. – Confronto tra v0, velocità di fondi misurate da Baum [6] e quelle calcolate in accordo a CCPS [1].

dell'espansione di un gas ad alta pressione. In Baum [4] sono stati studiati i fondi lanciati da gas ad alta pressione. In Baum [5] sono stati esaminati "razzi" o proiettili espulsi da recipienti cilindrici montati verticalmente contenenti gas in pressione e acqua fredda, gas in pressione e acqua calda, o un liquido in ebollizione che vaporizza a seguito dell'espansione. Lo stesso Baum [6] si è occupato delle velocità di fondi e di "razzi" generati dal cedimento circonferenziale, di recipienti a pressione montati orizzontalmente, causato dall'espansione di acqua sia alla temperatura di ebollizione che a temperatura più elevata. Le velocità suddette vengono espresse in termini di correlazioni e sono, comunque, limitate al caso dell'acqua.

Nella Fig. 1 è riportato il confronto tra le velocità ottenute con la procedura del CCPS [1] e i risultati sperimentali di Baum [6]. In base ai calcoli del CCPS [1], si è assunto che il 10% del liquido evapori e quindi contribuisca all'energia di espulsione. Tuttavia questo risultato, pur essendo congruente con i dati sperimentali, non deve essere generalizzato.

2.2.2. Numero e Massa dei Frammenti

Hauptmanns [9] ricava una distribuzione log-normale (cfr. Eq. (A9)) con μ=0,85516 e s=0,52448, basandosi sul numero di frammenti che derivano dai casi di incidenti trattati da Baker e al. [2] e Holden e Reeves [10], nei quali sono stati identificati 46 eventi rilevanti che hanno dato un numero medio di 2,7 frammenti. Inoltre, in accordo a quanto riportato da Holden e Reeves [10], il numero medio di frammenti che risultano da eventi con o senza incendio sono molto simili e solo nel caso di frattura fragile si può generare un maggior numero di frammenti, come è stato riscontrato in un evento con 7 pezzi osservati. Comunque la distribuzione sopra citata copre la maggioranza delle situazioni probabili e quindi è utilizzata universalmente.

La distribuzione della massa dei frammenti è stata stimata da Baker e al. [2] nel caso di esplosione di autocisterne, tuttavia si può assumere che la stessa distribuzione sia valida anche per i recipienti fissi (cfr. Holden e Reeves, [10]). Per rappresentare i dati in termini di distribuzione probabilistica, le masse dei frammenti sono state espresse come frazioni della massa totale del recipiente. I valori ottenuti sono rappresentati per mezzo di una distribuzione Beta con funzione densità di probabilità data dall'eq. (A10) e parametri a=0,41213 e b=1,3926.

2.2.3. Frazione dell'Energia Cinetica Totale per Frammento

Hauptmanns [9], in accordo a Baum [6], effettua un bilancio del momento della quantità di moto, assumendo che la pressione che allontana il frammento dal recipiente agisca per il tempo necessario finché la distanza del frammento dal recipiente risulti essere metà della lunghezza caratteristica $\sqrt{A}$, con A dato dalla massa del frammento mi, divisa per lo spessore della parete e la densità del materiale. Considerando costante la pressione durante tale intervallo di tempo si ha:

$$\gamma_i = \frac{m_i^{3/2}}{\sum_{i=1}^{I} m_i^{3/2}} \qquad (4)$$

Nell'equazione (4), γ_i è la frazione dell'energia E_k dell'equazione (3) impartita al frammento i, dove la massa m deve essere sostituita da m_i, ed I è il numero totale di frammenti. L'Eq. (4) si applica solo ai proiettili mentre i fondi, assumendo che essi abbiano la stessa massa, ricevono la stessa aliquota di energia cinetica.

2.2.4. Proiettili o Fondi

Dai risultati empirici, non vi è alcuna indicazione che un frammento sia un proiettile o un fondo, perciò nella pratica, si considera fondo un frammento con una massa tra il 90% e il 110% di quella del fondo stesso.

2.2.5. Angolo di Tiro

L'orientamento della traiettoria di un frammento è caratterizzato dagli angoli polare e azimutale. Non è stata riscontrata nessuna indicazione di una direzione preferenziale per l'angolo polare della traiettoria di volo. Quindi esso è descritto per mezzo di una funzione densità di probabilità costante nel range da 0° a 90°. Nel caso di fondi di recipienti orizzontali,

si assume un range tra 0° e 10°, poiché la direzione della forza è normale al fondo e sono plausibili solo piccole deviazioni nella direzione di volo.

Nello studio di Holden e Reeves [10]: l'angolo azimutale viene suddiviso in dodici settori e si assume che l'asse 0°-180° sia di simmetria e rappresenti la direzione media dei frammenti. Sulla base delle analisi incidentali, Hauptmanns raccomanda i seguenti valori di probabilità, rappresentati da una funzione di densità di probabilità a tratti: 30°÷150°: 0,2; 150°÷210°: 0,3; 210°÷330°: 0,2; 330°÷30°: 0,3.

2.2.6. Coefficiente di Drag (Resistenza)

Il coefficiente di drag C_D, dipende da fattori che caratterizzano il frammento quali la geometria, la scabrezza della superficie e l'orientamento rispetto alla direzione del flusso indisturbato. Nello studio si assume un frammento con punta arrotondata e spigoli vivi, la cui dipendenza dal numero di Reynolds sia trascurabile.

Per i fondi si ritiene che un intervallo ragionevole del coefficiente di drag sia CD=0,8÷1,1; il valore più basso vale per una semisfera, mentre il più alto si utilizza per un disco piatto.

Poiché le parti che costituiscono i proiettili sono appiattite (cfr. Holden e Reeves, [10]), si considera appropriato un range di CD=1,1÷1,8.

Entrambi gli intervalli del coefficiente di drag sono descritti da una funzione di densità di probabilità costante, in accordo all'Eq. (A7).

2.2.7. Coefficiente di Lift (Portanza)

Per i proiettili, le forze di lift vengono trascurate in quanto essi vengono considerati tozzi, pertanto il coefficiente di lift si applica solo ai fondi. Per questi ultimi si ammette solo una minima inclinazione compresa tra 0° e 10° rispetto all'orizzontale, calcolata usando la funzione di densità di probabilità triangolare di cui all'Eq. (A8) su [0°, 10°], con un valore medio di 3,3°. Il coefficiente di lift C_L allora è ottenuto da una approssimazione lineare di valori relativi ad un'ala rettangolare, forniti da Daugherty et al. [7], cioè:

$$C_L = 0{,}351 + 0{,}6723 \cdot \alpha \qquad (5)$$

in cui α è l'angolo di attacco. C_L è assunto uguale a zero per angoli al di fuori di [0°, 10°].

Nel calcolo delle aree proiettate A_D e A_L, deve essere tenuta in conto l'inclinazione della traiettoria.

2.2.8. Grado di Riempimento al Momento dell'Esplosione

La condizione di riempimento al momento dell'incidente, significativa per il calcolo dell'energia totale impartita ai frammenti, è praticamente sconosciuta nei casi reali. Pertanto si assume che essa sia ragionevolmente compresa tra i limiti di 0,1 e 0,8; ciò è descritto dalla densità di probabilità costante dell'Eq. (A7).

2.2.9. Direzione e Velocità del Vento

Si ipotizza che la direzione e la velocità del vento al momento dell'incidente siano trascurabili, ma potrebbero essere facilmente introdotte nei calcoli e, in tal caso, occorre considerare anche la terza dimensione.

3. LA SIMULAZIONE DI MONTE CARLO

Le equazioni e le considerazioni precedenti consentono di utilizzare il metodo di Monte Carlo per la generazione di un numero sufficientemente elevato di scenari possibili (simulazioni). Affinché le informazioni fornite dall'applicazione di tale metodo siano significative, le equazioni (1) e (2) sono valutate p volte, in ciascuna delle quali ottenendo le traiettorie $x(t)$ e $y(t)$, e le velocità $x(t)$ e $y(t)$ da cui sono facilmente ricavati altri parametri di interesse, p.e. la distanza di impatto del frammento e la corrispondente energia.

Per valutare il numero minimo di simulazioni da effettuare, si verifica che i risultati convergano stocasticamente col crescere di p verso i loro valori reali. Ciascuna simulazione fornisce un valore di tentativo per le quantità di input sopra indicate, che sono determinate in accordo con

quattro tipi di distribuzioni statistiche. Con riferimento alle distribuzioni utilizzate, si procede come segue.

Se $Z_{p,1}$ e $Z_{p,2}$ sono due numeri aleatori indipendenti uniformemente distribuiti in [0, 1], si ha (cfr. Ripley, [13] e Rubinstein e Kroese [14]):

- quantità distribuite log-normalmente

$$X_p = \exp\left(\sqrt{-2 \cdot \ln Z_{p,1}} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot Z_{p,2}\right) \cdot s_x + \mu_x\right) \tag{8}$$

- quantità uniformemente distribuite

$$X_p = a + (b - a) \cdot Z_{p,1} \tag{9}$$

- quantità distribuite a triangolo rettangolo

$$X_p = b + (a - b) \cdot \sqrt{1 - Z_{p,1}} \tag{10}$$

- quantità beta distribuite

$$X_p = \frac{S_p}{S_p + T_p} \tag{11}$$

dove p denota il p-esimo tentativo. Nell'Eq. (11), S_p e T_p sono variabili aleatorie con distribuzione Gamma-deviata, calcolate sulla base dell'algoritmo riportato da Ripley [13] e da Rubinstein e Kroese [14].

I risultati della simulazione consentono di valutare sia la probabilità che un frammento ricada in un settore intorno al recipiente sia quella che lo stesso raggiunga una certa distanza.

4. CASI DI STUDIO E VERIFICA

Allo scopo di verificare il programma per computer MISSC, Hauptmanns [9] ha ricostruito due casi partendo dalle informazioni parzialmente contraddittorie fornite da Baker e al. [2] e dalla modalità di frammentazione di recipienti cilindrici descritta da Pietersen [12]. E' stato utilizzato l'insieme di grandezze di input, determinato con le procedure sopra descritte, servendosi dei dati contenuti nella Tabella 1 dove sono riportate le informazioni di interesse.

4.1. Incidenti Riportati da Baker

In primo luogo sono stati studiati gli eventi 1, 2, 3, 4 e 5 di Baker e al. [2], che si riferiscono allo stoccaggio di propano a parità di condizioni. Le gittate registrate, bene approssimate con una distribuzione Gamma, sono rappresentate in Fig. 2, congiuntamente alla curva delle gittate calcolate.

Parameter	Propane (Baker et al., 1977)	Butane (Baker et al., 1977)	Mexico City (Pietersen, 1985)
Vessel mass	30000 kg	30000 kg	54650 kg
Vessel volume	130 m^3	130 m^3	180 m^3
Vessel diameter	3 m	3 m	3.5 m
Wall thickness	0.02 m	0.02 m	0.02 m
Vessel material density	7800 kg/m^3	7800 kg/m^3	7800 kg/m^3
Vessel centre point elevation above ground	2.5 m	2.5 m	2.0 m
Vessel temperature	28°C	28°C	28°C
Failure pressure	10 bar	2.6 bar	13.4 bar
Expansion work	1.2–1.6 MJ/m^3	0.2–0.4 MJ/m^3	1.8–2.2 MJ/m^3

Tabella 1 – Caratteristiche dei Recipienti da Baker e al. (1977) e Pietersen (1985).

In secondo luogo sono stati studiati gli incidenti 6, 7, 8, 9 e 10 di Baker e al. [2], che hanno interessato recipienti pieni di GPL costituito da butano. In questo caso le gittate dei frammenti provenienti dalla rottura del recipiente sono ben approssimate da una distribuzione log-normale, in accordo alla Eq. (A9) con μ=0,5122 e s=0,6636. Ciò è rappresentato in Fig. 3, congiuntamente alla curva delle gittate calcolate

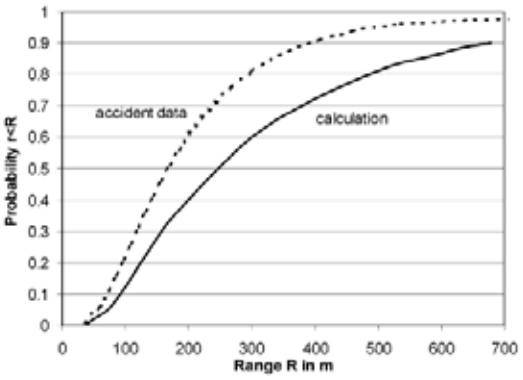


Fig. 2 – Confronto tra la probabilità di non superamento della gittata R dei frammenti in occasione degli incidenti con il propano descritti da Baker e al. [2] e in corrispondenza dei valori calcolati (fondi).

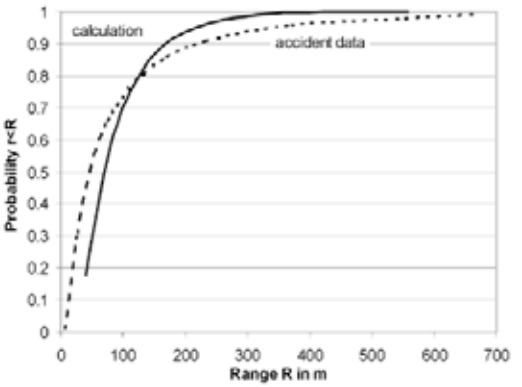


Fig. 3 – Confronto tra la probabilità di non superamento della gittata R dei frammenti in occasione degli incidenti con il butano descritti da Baker e al. [2] e in corrispondenza dei valori calcolati (fondi).

4.2 Mexico City

Nel BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) che si è verificato a Città del Messico, 4 recipienti cilindrici si sono disintegrati completamente (cfr. Pietersen, [12]). Tre di loro corrispondevano alla descrizione riportata in Tabella 1. Essi contenevano propano surriscaldato, butano o una miscela di essi. La pressione di rottura è stata valutata pari a 13,4 bar. Per il propano, che si suppone essere la sostanza contenuta nel recipiente in quanto predominante nel sito, questo corrisponde a una temperatura di saturazione di 310,9 K (37,9 °C). Dal grafico fornito in CCPS [1] si ricava un lavoro di espansione di 2 MJ/m3, che si riferisce alla frazione di vapore nel recipiente, poiché a quella temperatura è improbabile che la frazione liquida evapori. L'incertezza che circonda questa quantità è rappresentata da una funzione densità di probabilità costante in accordo alla Eq. (A7). L'intervallo scelto è [1,8 ; 2,2] MJ/m3. I rilievi empirici sulla gittata dei frammenti dati da Pietersen [12] sono ben rappresentati da una distribuzione log-logistica, come mostra la Fig. 4., dove si evidenzia che le gittate calcolate risultano in buon accordo con i valori riscontrati sul campo. I dati elaborati si riferiscono solo al caso dei fondi, in quanto dai rilievi post incidentali è risultato che tutti i proiettili si trovavano nelle vicinanze della posizione di installazione del recipiente, come d'altronde risulta da un calcolo che ha dimostrato che tali proiettili rimangono all'interno di un raggio di 200 m con una probabilità di 0,96.

Inoltre, si è rilevato che l'energia media di un frammento che colpisce il terreno dopo aver completato la sua traiettoria aerea è 16,8 MJ, mentre l'energia persa a causa del drag risulta pari a 2,7 MJ. La velocità media al contatto con il terreno è 125,9 m/s, cioè una quantità molto più grande di quella richiesta per forare un recipiente che, in accordo a Pietersen, è compresa nell'intervallo da 4 a 12 m/s.

Al fine di dimostrare la validità del metodo, sono state calcolate le probabilità condizionate che un individuo in piedi, nei dintorni del recipiente, sia colpito e la corrispondente energia dell'impatto a seguito dello scoppio di un recipiente. Esse sono riportate in Fig. 5 dove, per semplicità di rappresentazione, non è mostrata esplicitamente la variabilità dell'angolo azimutale (cfr. sezione 2.2.5), infatti sono indicate le probabilità medie sui dodici settori considerati.

Allo scopo di calcolare le frequenze attese per un particolare incidente, le probabilità di Fig. 5 devono essere moltiplicate per la frequenza attesa relativa all'esplosione di un recipiente che dipende dallo scenario considerato. Per rotture accidentali può essere indicativo il range di

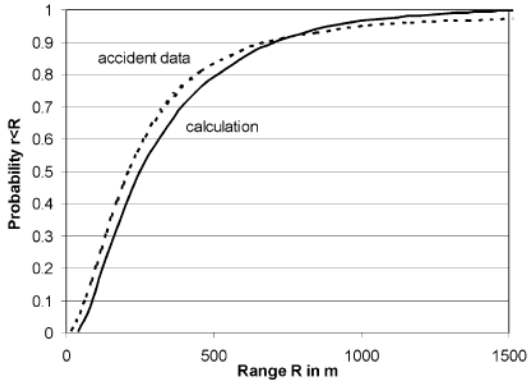


Fig. 4 – Confronto tra la probabilità di non superamento della gittata R dei frammenti in occasione degli incidenti di Città del Messico descritti da Pietersen [12] e in corrispondenza dei valori calcolati (fondi).

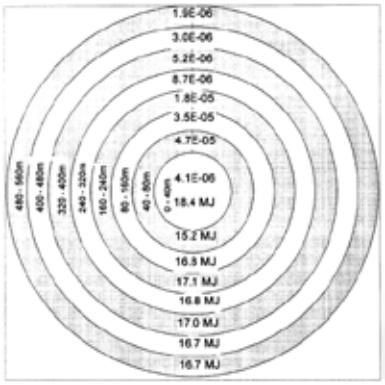


Fig. 5 – Probabilità che un individuo in prossimità del recipiente sia colpito e corrispondenti energie di impatto in relazione alle condizioni di esplosione di Città del Messico della Tabella 1.

$10^{-3} \div 10^{-6}$ per anno, citato da Lees [11]. Inoltre, per i casi di incendio, di impatto di frammenti da installazioni circostanti e di errore di manovra, come ad esempio il sovrariempimento, dovrebbero essere considerate le frequenze dipendenti dalle condizioni relative al caso in esame.

I risultati che si ottengono dalla presente procedura consentono di supportare le decisioni per stabilire le distanze di sicurezza previste dalle norme.

5. CONCLUSIONI

Per quanto sopra illustrato, si può certamente riconoscere che Hauptmanns [9] ha sviluppato un metodo che è in grado sia di analizzare gli incidenti in cui si verificano frammentazioni, sia di prevedere le conseguenze di tali eventi. Infatti, la procedura esposta tiene conto del carattere stocastico o dell'incertezza della maggior parte delle variabili coinvolte e quindi consente di elaborare verosimilmente i dati raccolti in occasione di eventi incidentali, in modo da poterli utilizzare per fare previsioni. Essa è verificata, sebbene sulla base di poche evidenze, e si dimostra adeguata per le applicazioni in studio. Tuttavia sarebbe necessario considerare ulteriori risultati derivanti da esperimenti o da incidenti. Inoltre, il metodo proposto, utilizzando le soluzioni analitiche delle equazioni del moto, risulta flessibile e veloce; e può anche essere facilmente esteso per considerare ulteriori grandezze di interesse, quali l'impatto del vento, o modificato, per trattare il caso dei recipienti cilindrici installati verticalmente. Dal punto di vista operativo, la procedura qui presentata costituisce altresì un utile strumento per pianificare misure di protezione contro gli incidenti dovuti all'impatto di frammenti, generati dallo scoppio di recipienti in pressione, sia all'interno che all'esterno di uno stabilimento industriale.

APPENDICE A

Nel lavoro di Hauptmanns [9] le soluzioni delle equazioni (1) e (2) sono date solo in termini di velocità, mentre qui, per completezza, si riportano anche le soluzioni per le traiettorie, ottenute per integrazione delle velocità.

Soluzione dell'Eq. (1):

velocità
$$\dot{x}(t) = \frac{m \cdot v_0 \cdot \cos\beta}{K \cdot v_0 \cdot t \cdot \cos\beta + m} \qquad \text{(A1)}$$

traiettoria
$$x(t) = \frac{m}{K} \cdot \ln\left(K \cdot v_0 \cdot t \cdot \cos\beta + m\right) \qquad \text{(A2)}$$

Soluzione dell'Eq. (2):

- Ascendente

velocità
$$\dot{y}(t) = \frac{v_0 \cdot \sin\beta \cdot \cos(\alpha t) - \frac{m \cdot \alpha}{K} \cdot \sin(\alpha t)}{\cos(\alpha t) + \frac{v_0 \cdot K \cdot \sin\beta}{m \cdot \alpha} \cdot \sin(\alpha t)} \tag{A3}$$

traiettoria
$$y(t) = \frac{m}{K} \cdot \ln\left[\frac{v_0 \cdot K \cdot \sin\beta}{m \cdot \alpha} \cdot \sin(\alpha t)\right] \tag{A4}$$

- Discendente

velocità
$$\dot{y}(t) = \frac{m \cdot \alpha}{K} \cdot \frac{\gamma \cdot \exp(-\alpha t) + \exp(\alpha t)}{\gamma \cdot \exp(-\alpha t) - \exp(\alpha t)} \tag{A5}$$

traiettoria
$$y(t) = \frac{m \cdot \alpha}{K}\left\{t - \frac{\ln\left[2(\exp 2\alpha t - \gamma)\right]}{\alpha}\right\} \tag{A6}$$

Nelle equazioni da (A1) a (A6) compaiono le seguenti quantità, in aggiunta a quelle delle equazioni (1) e (2):

- v_0: velocità iniziale del frammento,
- β: angolo di lancio,
- $K = \rho \cdot \left(C_D \cdot A_D \mp C_L \cdot A_L\right)/2$ (con – per la fase ascendente, + per quella discendente e C_L=0 per la direzione x,
- $\alpha = \sqrt{g \cdot K/m}$,
- $\gamma = \exp\left(2\alpha t^*\right)$,
- t^*: tempo per raggiungere la massima altezza della traiettoria aerea.

Le seguenti funzioni di densità di probabilità sono utilizzate per descrivere le grandezze stocastiche o incerte sopra citate:

- costante

$$f_x(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{b-a} & \text{se } b \geq x \geq a \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \tag{A7}$$

- triangolo rettangolo

$$f_x(x) = \begin{cases} \dfrac{2 \cdot b}{(b-a)^2} - \dfrac{2 \cdot x}{(b-a)^2} & \text{se } b \geq x \geq a \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \tag{A8}$$

dove x è la variabile aleatoria, a il limite inferiore e b quello superiore dell'intervallo.

- log-normale

$$f_x(x) = \frac{1}{x \cdot s_x\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_x}{s_x}\right)^2\right] \quad 0 < x < \infty \tag{A9}$$

dove x è la variabile aleatoria, Qx il valore atteso di ln(x), e sx la corrispondente deviazione standard.

- Beta

$$f_x(x) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\cdot\Gamma(b)} \cdot x^{a-1} \cdot (1-x)^{b-1} \quad 0 \le x \le 1 \tag{A10}$$

dove a e b sono i parametri della distribuzione, che sono stimati sulla base di dati empirici, utilizzando il metodo della massima verosimiglianza.

BIBLIOGRAFIA

[1] Anon: "Guidelines for Evaluating the Characteristic of Vapor Cloud Explosion, Flash Fires and BLEVEs", CCPS, AIChe, 1994

[2] Baker W.E., Kulesz J.J., Ricker R.E., Bessey Westine P.S., Parr V.B., Oldham G.A.: "Workbook for predicting pressure wave and fragment effects of exploding propellant tanks and gas storage vessels", NASA CR-134906, 1977

[3] Baum M.R.: "Velocity of a single small missile ejected from a vessel containing high pressure gas", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 6, (4), 251-264, 1993

[4] Baum M.R.: "Rupture of a gas-pressurized cylindrical vessel: the velocity of a detached end cap", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 8, (3), 149-161, 1995

[5] Baum M.R.: "Rocket missiles generated by failure of a high pressure liquid storage vessel", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 11, 11-24, 1998

[6] Baum M.R.: "Failure of a horizontal pressure vessel containing a high temperature liquid: the velocity of end-cap and rocket missiles", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 12, 137-185, 1999

[7] Daugherty R.L., Franzini J.B., Finnermore E.J. "Fluid Mechanics with Engineering Applications", Mc Graw Hill Book, 1989

[8] Hauptmanns U. "A Monte-Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions" Proceedings of the International Conference on Monte Carlo Simulation, Monte Carlo, 18-21, Giugno 2000

[9] Hauptmanns U. "A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 14, 395-402, 2001

[10] Holden P.L., Reeves A.B.: "Fragment hazards from failures of pressurized liquified gas vessels", IChemE Symposium Series, 93, 205-220, 1985

[11] Lees F.P.: "Loss Prevention in the Process Industries", Vol. 2, Butterworth Heinemann, 1996

[12] Pietersen C.M., "Analysis of the LPG Incident in San Jaun Ixhuatepec Mexico City, 19 Novembre 1984", Apeldoorn: TNO, 1985

[13] Ripley B.D.: "Stochastic Simulation", John Wiley & Sons, 1987

[14] Rubinstein R.Y., Kroese D.P.: "Simulation and Monte Carlo Method", John Wiley & Sons, 2008

sessione POSTER

12
La sicurezza elettrica nelle camere iperbariche

D. Sallustio* - N. Altamura*
M. Godono**

** ISPESL, Dipartimento Territoriale di Bari*
*** Sistemi Iperbarici s.r.l.*

SOMMARIO

Nella norma tecnica europea di settore e nelle Linee Guida ISPESL, il locale che ospita la camera iperbarica e la stessa camera sono assimilati a locali di terapia medica per i quali si richiede l'applicazione della Norma CEI 64.8 sez. 710. In tali locali è necessario tutelare i pazienti considerando particolari prescrizioni per la sicurezza. Nella maggior parte dei casi la sicurezza può essere raggiunta soprattutto mediante provvedimenti sull'impianto. L'uso di apparecchi elettromedicali e di apparecchiature biomedicali su pazienti che si trovino sottoposti a cure intensive, in condizioni critiche, richiede un'elevata affidabilità e sicurezza degli impianti elettrici. Poiché nelle camere iperbariche è sovente l'utilizzo di ventilatori (per la respirazione assistita) tale locale è classificato, secondo le Norme CEI 64.8 sez. 710 di gruppo 2 in quanto il paziente è sottoposto a trattamenti vitali dove la mancanza di alimentazione può comportare pericolo per la vita.

L'aspetto legato all'alimentazione non può, dunque, essere considerato secondario né può essere lasciata la responsabilità dell'utilizzo di tali apparecchiature agli operatori sanitari che spesso agiscono affidandosi ai sistemi di allarme incorporati negli apparecchi, invece di prestare una certa attenzione alle azioni che sono in corso ed ai rischi legati alla sicurezza elettrica.

1. GENERALITÀ

Come riportato nella norma europea UNI EN 14931 le camere iperbariche per uso terapeutico sono utilizzate per la somministrazione di terapia con ossigeno iperbarico e per il trattamento di patologie da decompressione. Tali camere sono realizzate per consentire la somministrazione sicura di miscele di gas iperossici pressurizzati evitando i rischi di incendio all'interno della camera e i rischi di compressione o decompressione incontrollata. Esse devono consentire tutti i livelli di assistenza ai pazienti fino alla terapia intensiva con tutte le apparecchiature necessarie e fornire un ambiente di lavoro sicuro per chi assiste il paziente.

Trattandosi di dispositivi medicali, i sistemi di trattamento iperbarico devono essere in conformità alla Direttiva 93/42/CE sui dispositivi medicali. I componenti pressurizzati all'interno di questi sistemi devono essere in conformità alla Direttiva 97/23/CE sulle apparecchiature pressurizzate. Durante le fasi di installazione, messa in servizio, funzionamento secondo l'uso normale e manutenzione secondo le istruzioni del fabbricante, i sistemi di trattamento iperbarico non devono provocare alcun pericolo per la sicurezza che possa essere previsto impiegando le procedure per l'analisi dei rischi in conformità alla EN ISO 14971 e che possa essere correlato all'applicazione prevista in condizioni normali e in condizione di primo guasto.

Tralasciando quelli che sono i rischi legati all'incendio per la potenziale presenza di atmosfera particolarmente ricca di ossigeno (comburente) all'interno della camera iperbarica, si intende

focalizzare l'attenzione sui rischi connessi all'elettricità.

Le installazioni elettriche dell'impianto del sistema di trattamento iperbarico al di fuori di essa devono essere conformi alla IEC 60364-7-710 (CEI 64-8/7). Le apparecchiature elettriche e le installazioni all'interno della camera iperbarica, comprendenti l'illuminazione, devono essere conformi alla categoria di applicazione specificata dalla IEC 60364-7-710 per questi spazi, a seconda del tipo di uso medicale e di apparecchiatura medicale, ma almeno alla categoria di applicazione 1. La tensione delle installazioni nella camera iperbarica può superare 42V solo se le installazioni sono omologate contro i rischi dell'alta tensione.

2. RISCHI CONNESSI ALL'UTILIZZO DI DISPOSITIVI MEDICI ED APPARECCHIATURE ELETTROMEDICALI

L'utilizzo di dispositivi medici e apparecchiature elettromedicali costituiscono una potenziale fonte di ignizione (per esempio scintille provocate da qualsiasi fattore o da riscaldamento eccessivo); questo rappresenta un grosso problema nell'atmosfera della camera iperbarica ad aria compressa nella quale le pressioni parziali di ossigeno possono potenzialmente innalzarsi. L'utilizzo di dispositivi elettromedicali da installare all'interno di una camera iperbarica deve essere tali da non provocare un rischio di ignizione. Pertanto, il fabbricante deve considerare:

- l'uso di dispositivi a basso consumo (bassa tensione e bassa corrente);
- il collocamento della fonte di alimentazione del dispositivo esternamente alla camera;
- il collocamento degli interruttori del dispositivo esternamente alla camera.

In riferimento alla Norma UNI EN 14931, alcuni dispostivi medici, progettati e fabbricati per l'uso in condizioni di pressione atmosferica, non possono essere utilizzati in condizioni iperbariche, in quanto la loro introduzione potrebbe causare vari problemi, quali:

- frantumazione, implosione ed esplosione di alcuni componenti sotto l'effetto delle variazione di pressione atmosferica, con conseguenti rischi di corto circuito, formazione di scintille, traboccamento, proiezione di frammenti o di liquidi;
- modifica delle prestazioni nominali del dispositivo con:
  - peggioramento delle misurazioni registrate dalle sonde;
  - peggioramento della lettura del display che non corrisponde più ai valori misurati;
  - peggioramento del flusso, della pressione e della frequenza con la quale il dispositivo somministra i prodotti medicali ai pazienti;
  - possibile formazione di bolle gassose al momento della decompressione all'interno dei liquidi contenuti nel dispositivo medico o da essi trasportati;

inoltre i dispositivi medici introdotti nella camera iperbarica possono:

- essere lubrificati con un prodotto che sia infiammabile in presenza di atmosfera potenzialmente arricchita di ossigeno e di conseguenza causare un incendio;
- essere costituiti da materiali o trasportare sostanze facilmente combustibili in un'atmosfera potenzialmente arricchita di ossigeno;
- essere costituiti da materiali che diventino tossici mediante una reazione chimica in atmosfera potenzialmente arricchita di ossigeno.

La camera iperbarica deve poter ospitare anche pazienti su barella che richiedono un monitoraggio con dispositivi elettromedicali che generalmente vengono utilizzati in terapia intensiva, tra i quali:

- elettrocardiografo esterno alla camera iperbarica;
- dispositivo di misurazione della pressione arteriosa;
- dispositivo di analisi per ossimetria transcutanea;
- respiratore volumetrico-pressometrico idoneo all'iperbarismo;
- sistema infusionale meccanico (pompa siringa);
- dispositivo di misurazione della pressione arteriosa invasiva;
- dispositivo per il monitoraggio centrale della pressione venosa;
- dispositivo per il monitoraggio della pressione arteriosa;
- dispositivo per il monitoraggio della pressione arteriosa polmonare.

Tali dispositivi elettromedicali, nonostante debbano essere utilizzati con tutte le dovute cautele poiché in ambiente ricco di comburente e, pertanto, fonti di ignizione, rappresentano un potenziale rischio connesso ad elettrocuzione per microshock elettrico, qualora la camera

iperbarica fosse installata all'interno di un ambiente non idoneamente classificato secondo la Norma CEI 64-8/7.

3. CLASSIFICAZIONE DEL LOCALE DI INSTALLAZIONE DELLA CAMERA IPERBARICA

È evidente che una camera iperbarica, quale dispositivo elettromedicale utilizzabile anche con altre apparecchiature elettromedicali suddette, deve essere installata all'interno di un locale medico che garantisca la sicurezza dei pazienti. Fermo restando che le apparecchiature elettromedicali su pazienti sottoposti a cure intensive (di importanza critica) devono garantire un elevato grado di affidabilità e sicurezza nel rispetto delle norme ad esse applicabili, non possono prescindere in alcun modo dalla sicurezza dell'impianto elettrico e dalla peculiarità con il quale esso viene progettato e realizzato.

La Norma CEI 64-8/7 definisce un locale ad uso medico quello destinato a scopi diagnostici, terapeutici, chirurgici, di sorveglianza o di riabilitazione dei pazienti e viene classificato in uno dei seguenti gruppi:

Gruppo 0

Locale ad uso medico nel quale non si utilizzano apparecchi elettromedicali con parti applicate;

Gruppo 1

Locale ad uso medico nel quale le parti applicate sono destinate ad essere utilizzate nel modo seguente:

- esternamente;
- invasivamente entro qualsiasi parte del corpo, ad eccezione della zona cardiaca.

Gruppo 2

Locale ad uso medico nel quale le parti applicate sono destinate ad essere utilizzate in applicazioni quali interventi intracardiaci, operazioni chirurgiche, o il paziente è sottoposto a trattamenti vitali dove la mancanza di alimentazione può comportare pericolo per la vita.

Qualsiasi volume in cui un paziente con parti applicate può venire in contatto intenzionale, o non intenzionale, con altri apparecchi elettromedicali o sistemi elettromedicali o con masse estranee o con altre persone in contatto con tali elementi, costituisce la *zona paziente* che la Norma CEI 64-8/7 stabilisce come riportato nelle seguenti figure (Fig.1 e Fig. 2).

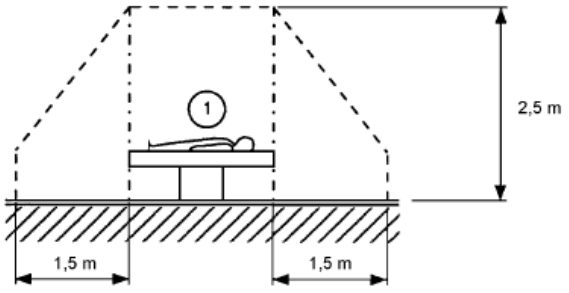


Fig. 1 (Area zona paziente)

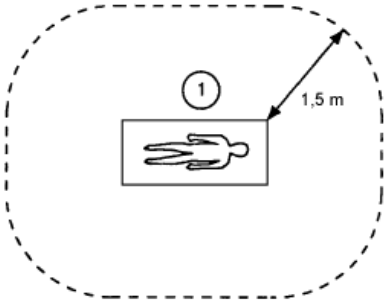


Fig. 2 – Area zona paziente

Premesso che la zona paziente non si applica nel caso di utilizzo di dispositivi elettromedicali alimentati con sorgente elettrica interna tali da non creare condizioni di microshock, è bene sottolineare che la camera iperbarica ha un volume confrontabile con la zona paziente su definita (Fig. 3 e Fig. 4).



Fig. 3 (Vista interna di una camera iperbarica)



Fig. 4 (Presenza di barella all'interno di una camera iperbarica)

L'utilizzo di dispositivi medicali di vitale importanza, a servizio del paziente in trattamento iperbarico, che possono essere collegati alla rete elettrica di alimentazione, anche se installati all'esterno della camera iperbarica., richiedono una classificazione di *gruppo 2* del locale medico ove è installata la stessa camera iperbarica in analogia ai locali per trattamenti intensivi.

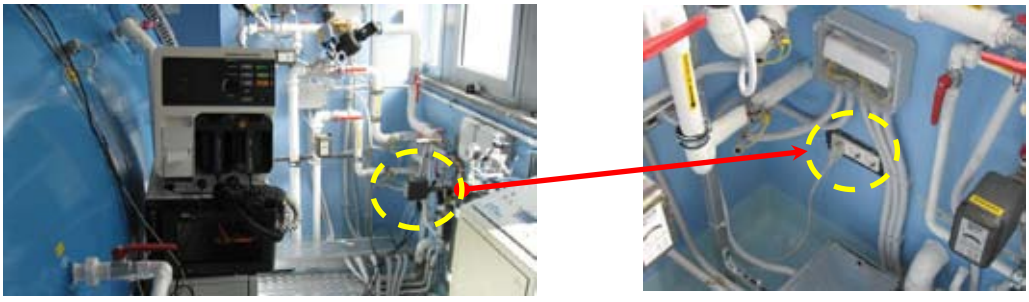


Fig. 5 (ECG e ventilatore polmonare connessi alla rete elettrica con vista del particolare)

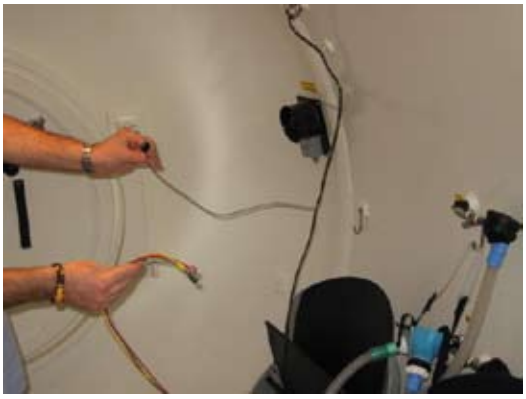


Fig. 6 (Cavi di segnale per ECG e ventilatore polmonare connesso alla rete elettrica)

4. PROTEZIONE CONTRO I CONTATTI INDIRETTI

La protezione dai contatti indiretti (fault protection) è realizzata al fine di contrastare i guasti dell'isolamento e le possibili conseguenze che ne derivano, e, in generale, può essere ottenuta in diversi modi:

- *Protezione senza interruzione automatica*: destinata ad impedire il manifestarsi di tensioni pericolose su masse accessibili in caso di guasto dell'isolamento principale, con l'utilizzo di componenti elettrici di Classe II o di isolamento almeno equivalente (CEI 64-8/413.2);
- *Protezione mediante luoghi non conduttori*: destinata ad evitare il contatto simultaneo con parti che possano trovarsi a potenziale diverso a seguito di un guasto di isolamento principale di parti attive (CEI 64-8/413.3);
- *Protezione mediante collegamento equipotenziale locale non connesso a terra*: destinata ad evitare il formarsi di tensioni di contato pericolose, a seguito di un cedimento dell'isolamento principale di parti attive (CEI 64-8/413.4);
- *Protezione mediante separazione elettrica*: destinata ad evitare correnti pericolose a seguito del contato con masse che possano essere sottoposte a tensione per un guasto dell'isolamento principale delle parti attive (CEI 64-8/413.5);
- *Protezione mediante interruzione automatica dell'alimentazione*: necessaria qualora in caso di guasto, si possano verificare effetti fisiologici dannosi all'infortunato, a causa del valore e del tempo di persistenza della tensione di contatto.

4.1 Il sistema IT-M

Nella zona paziente dei locali ad uso medico di gruppo 2 il paziente è sottoposto ai seguenti rischi di natura elettrica:

- rischio di elettrocuzione e/o d microshock per contatti diretti e indiretti (rischio che aumenta per il fatto che il paziente è spesso a contatto con parti applicate di elettromedicali);
- mancanza di energia elettrica degradazione delle prestazioni degli elettromedicali a causa della scarsa qualità dell'alimentazione elettrica;
- innesco di miscele di gas medicali per archi elettrici o scintille dovute a cariche elettrostatiche.

Nei locali di gruppo 2, in ragione dei rischi a cui è sottoposto il paziente, non sono ammessi sistemi di protezione basati sull'interruzione automatica dell'alimentazione, per due motivi essenziali:

- essendo il paziente soggetto a rischi di microshock, i tempi minimi di intervento delle protezioni sarebbero comunque eccessivi;
- in caso di intervento delle protezioni, la mancanza di alimentazione determinerebbe l'interruzione di trattamenti vitali con possibilità di morte del paziente.

Tralasciando gli approfondimenti teorici, in tali locali di gruppo 2, per ridurre il valore della

tensione di contatto Ut talea non creare un valore di corrente superiore alla soglia massima sopportabile in caso di microschock (50 μA) è necessario:

- realizzare l'equipotenzialità delle masse e masse estranee accessibili al paziente, al nodo equipotenziale, limitando la resistenza offerta dai conduttori di protezione impiegati;
- utilizzare un sistema di distribuzione IT-M.

Un sistema IT-M è realizzato con l'utilizzo di un trasformatore di isolamento ad uso medicale e di un dispositivo di controllo permanente dell'isolamento non disinseribile in accordo con la Norma CEI EN 61557-8. Il trasformatore di isolamento ad uso medicale (IEC 65558-2-15) deve avere caratteristiche particolari ed in particolare deve essere dotato di una separazione tra gli avvolgimenti, ottenuta tramite isolamento doppio o rinforzato, ed isolamento doppio o rinforzato tra gli avvolgimenti e le masse dell'apparecchiatura; in aggiunta può essere previsto uno schermo metallico tra gli avvolgimenti, collegato a terra.

L'utilizzo di un sistema IT-M riduce la suddetta tensione di contatto Ut limitando fortemente la corrente di guasto Ig e non determina lo scatto delle protezioni garantendo la continuità di servizio anche in condizioni di primo guasto a terra rilevato dal dispositivo di controllo dell'isolamento (EN 61557-8 e CEI 64-8/710.413.1.5) con pronta comunicazione al personale tecnico che deve intervenire, appena possibile, per ricercare ed eliminare il guasto stesso.

Alla luce di quanto suddetto, le prese a spina per alimentare apparecchiature non fisse che possono essere comunque utilizzate dentro la zona paziente, devono essere alimentate attraverso il sistema IT-M e non devono essere intercambiabili con altri sistemi presenti nello stesso locale di gruppo 2.

5. ALIMENTAZIONE DI EMERGENZA

Questo rappresenta un altro aspetto fondamentale per la gestione in sicurezza delle camere iperbariche. La Norma CEI 64-8/2 definisce due diverse tipologie di alimentazione di emergenza:

- *l'alimentazione di sicurezza* che garantisce l'erogazione di energia elettrica alle utenze privilegiate in caso di mancanza di alimentazione ordinaria, alfine di garantire la sicurezza delle persone;
- *l'alimentazione di riserva* che compie lo stesso servizio ma per esigenze diverse dalla sicurezza delle persone.

Nei locali medici la mancanza di energia elettrica primaria comporta sempre, direttamente o indirettamente, pericoli per il paziente, quindi l'alimentazione di emergenza è sempre di sicurezza.

Le utenze privilegiate, essenziali in ragione delle prestazioni che forniscono, devono essere scelte dal progettista in accordo con la direzione sanitaria o del responsabile sanitario della struttura, indicando per ciascuna di esse entro quale tempo e per quale durata deve essere garantita l'alimentazione di sicurezza. Nei locali medici, in relazione al tipo di locale ed all'attività che viene svolta, sono prescritte le classi di continuità:

1. 0,5 (interruzioni brevi): disponibile con periodo di commutazione $0{,}15<T<0{,}5$ s;
2. 15 (interruzioni medie): disponibile con periodo di commutazione $0{,}5<T<15$ s;
3. <15 (interruzioni lunghe): disponibile con periodo di commutazione $T>15$ s.

Per gli apparecchi elettromedicali che necessitano di un'alimentazione di sicurezza entro 0,5 s (di vitale importanza per il paziente) deve essere adottata una sorgente di sicurezza di classe 0,5 che deve ripristinare, in caso di mancanza di alimentazione ordinaria, l'alimentazione entro 0,5 s per una durata minima di 3 ore riducibile a 1 ora nel caso sia possibile commutare l'alimentazione (anche manualmente) su un'altra sorgente di sicurezza (ad es. gruppo elettrogeno). La sorgente di sicurezza di classe 0,5 di continuità è ottenuta solitamente attraverso i gruppi statici di continuità UPS (Uninterruptible Power Supply) che, in realtà, possono garantire un'alimentazione di sicurezza avente un più elevato grado di continuità rispetto a quanto richiesto (in alcune condizioni di funzionamento assicurano una condizione di continuità con commutazione praticamente a tempo zero).

Nel caso della camera iperbarica è importante garantire l'illuminazione di emergenza all'interno e all'esterno in particolare sulla console di controllo mediante l'utilizzo di un UPS dedicato.

Resta ben inteso che deve essere previsto un sistema di alimentazione di emergenza per il sistema antincendio installato e per l'utilizzo terapeutico a pressioni maggiori di 200 kPa (2 bar) rispetto alla pressione atmosferica.

6. CONCLUSIONI

L'aspetto legato all'alimentazione elettrica non può, dunque, essere considerato secondario rispetto agli altri rischi derivanti dall'utilizzo della camera iperbarica. Per questo motivo la camera iperbarica deve essere installata all'interno di un locale medico classificato, secondo le norme CEI 64-8/7, di gruppo 2, il quale deve essere, a sua volta, sottoposto alle verifiche periodiche di sicurezza e funzionalità previste dalla normativa vigente. Ancora oggi, purtroppo molto spesso, accade che gli operatori sanitari di settore si affidano ai sistemi di allarme incorporati negli apparecchi senza prestare una certa attenzione alle azioni che sono in corso ed ai rischi legati alla sicurezza elettrica. È, pertanto auspicabile, così come richiamato nel D. Lgs. n. 81/2008 e s.m.i., attuare dei percorsi formativi specifici ai suddetti operatori per assicurare loro un corretto utilizzo della camera iperbarica e delle apparecchiature e dispositivi medicali ad essa correlati.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] D. Lgs. 9 aprile 2008 n. 81 e s.m.i. "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro";

[2] Norma UNI EN 14931 "Camere iperbarche multiposo per terapia iperbarica";

[3] Norma CEI 64-8/7 "Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in c.a. e a 1500 V in c.c. – Ambienti ed applicazioni particolari";

[4] Linee Guida ISPESL "La gestione in sicurezza delle camere iperbariche multiposto in ambiente clinico"

[5] NFPA 99 "Standard for Health Care Facilities";

[6] Norma CEI EN 60601-1 "Sicurezza delle apparecchiature elettromedicali"

13
La modellazione microstrutturale e lo studio del danno in acciai ad alta temperatura

A. Rinaldi* - A. Alvino* - D. Lega* - V. Mazzocchi* - E. Pichini* F. Giacobbe**

** ISPESL Dipartimento Tecnologie di Sicurezza*
*** ISPESL Dipartimento di Messina*

SOMMARIO

Rotture fragili possono manifestarsi in acciai esposti ad alte temperature a seguito della nucleazione e coalescenza di microcricche a bordo grano. Il fenomeno interessa qualitativamente acciai feritici, martensitici e austenitici. Tuttavia mentre per i tradizionali acciai ferritici basso legati Cr-Mo il danno da creep può essere monitorato efficaciemente ed agevolmente con tecniche non distruttive, per i materiali più recenti (es. i martensitici 9-12 Cr o gli HP grade Ni-Cr austenitici impiegati negli impianti di *steam reforming*) sussistono difficoltà per il rilevamento del danno. Lo sviluppo di modelli teorici affidabili per la previsione del danno rappresenta dunque una via interessante per sviluppare logiche di gestione del problema di carattere meno empirico. Il danneggiamento è un fenomeno stocastico multiscala che mal si presta ad una schematizzazione semplice con la meccanica del continuo. In questi anni stanno emergendo nuovi modelli microstrutturali che promuovono un approccio bottom-up, partendo dalla considerazione esplicita della microstruttura del materiale. Tra essi, la meccanica statistica del danneggiamento (SDM) è una metodologia innovativa e flessibile in grado di razionalizzare e semplificare lo studio di alcune forme di danneggiamento altrimenti di difficile interpretazione. Tali modelli incorporano le proprietà microscopiche del materiale in esame, modellandone correttamente l'evoluzione. In questo modo è possibile studiare i processi di localizzazione del danno responsabili della rottura a seguito di fenomeni di nucleazione ed interazione tra microcricche, ottenendo parametri di danno *D* fisicamente motivati. Il lavoro disserta sulle potenzialità di questo metodo con riferimento al degrado di acciai eserciti in temperatura.

1. INTRODUZIONE.

Il degrado degli acciai soggetti ad esposizione prolungata ad alte temperature è un problema di grande rilevanza tecnologica negli impianti per la produzione di energia da fonti fossili. Tale effetto si estrinseca a livello macroscopico con la progressiva perdita di elasticità, resistenza e duttilità (osservati da prove meccaniche di tipo distruttivo per esmpio) ed è causato da meccanismi di scorrimento a caldo (creep) che causano l'evoluzione ed il danneggiamento del materiale a livello microstrutturale. Il tipo di meccanismi e la cinetica variano notevomente in base allo sforzo applicato (e.g. pressione del tubo), alla temperatura ed al tipo di microstruttura (e.g. composizione, presenza di elementi di lega, distribuzione e tipo di fasi, dimensione e distribuzione dei grani, difetti, etc.), nonchè alle condizioni di esercizio ed alla simultanea presenza di altri meccanismi di danno (e.g. corrosione, cicli di fatica, infragilimento da idrogeno, sovraccarichi accidentali, etc.). In generale, per ogni materiale si stabilisce una temperatura di inizio creep T_{IC} che rappresenta una soglia convenzionale utilizzata nelle norme

per la considerazione del fenomeno stesso a fini progettuali e gestionali. Per acciai basso legati essa rappresenta il 30-35% della temperature di fusione T_m (K) espressa in kelvins ma è più elevata nelle moderne leghe progettate per utilizzo specifico in temperatura. Al di sopra di questa temperatura, il fenomeno del creep è tanto più accelerato quanto più la temperatura T e lo forzo applicato σ_C sono elevati. Questi due parametri non solo controllano la velocità di degrado e la vita residua del materiale in esame ma anche il modo di rottura. In particolare, per sollecitazioni σ_C molto inferiori della resistenza ultima del materiale (UTS) determinata dal test di trazione, il creep può causare il sopraggiungere di improvvise rotture di carattere fragile anche in materiali normalmente duttili, come qualitativamente rappresentato in Figura 1. La transizione nel modo di rottura dell'acciaio è riconducibile alle modifiche irreversibili della microstruttura indotte nel tempo, le quali di solito producono un indebolimento graduale dei bordi di grano e la formazione di microcricche. Al crescere della loro densità, esse coalescono al termine del cosiddetto creep terziario portando alla rottura finale (Figura 1b). La normativa spesso attribuisce una dimensione massima convenzionale alle microcricche (es. 100 μm) oltre la quale si parla di macrocricca.

Negli acciai ferritici basso legati Cr-Mo resistenti al creep e tradizionalmente impiegati negli impianti di energia, la trasformazione della struttura bifasica ferritico-perlitica originale porta alla precipitazione di carburi a bordo grano e successivi fenomeni di microcavitazione che preludono alla nucleazione delle microcricche. Il processo di danneggiamento in questo tipo di materiali è ben noto ed è stato oggetto di normazione fin dagli anni '70 a seguito della caratterizzazione attribuibile primariamente a Neubauer [1,2]. Esso può essere monitorato efficaciemente attraverso metodiche non distruttive, quali le repliche metallografiche [3], che consento di gestire praticamente il problema attraverso ispezioni periodiche opportunamente cadenzate in base alla vita utile stimata. Scongiurare pericolese rotture improvvise dei componenti attraverso una manutenzione programmata non è però una strategia sempre percorribile o agevole per qualunque acciaio. È necessario infatti che il rilevamento del danno sia sufficientemente tempestivo, ovvero che la cinetica del creep terziario non sia troppo rapida.

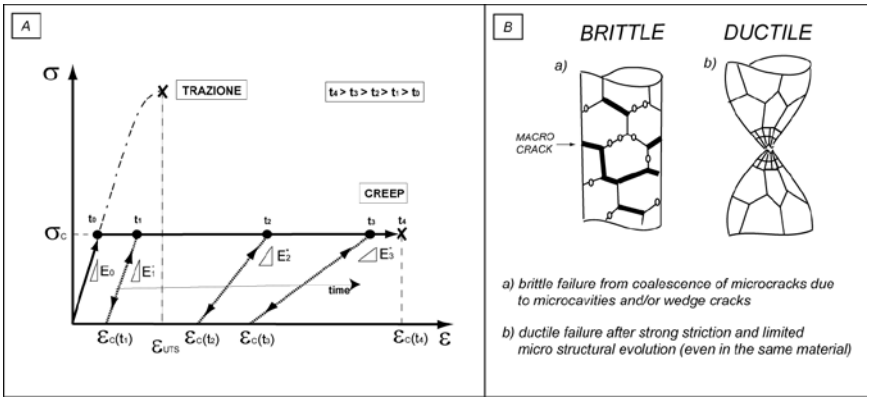


Figura 1. (a) Confronto qualitativo nel piano σ-ε tra le risposte di un test statico di trazione e di uno di creep a basso sforzo (<< UTS). Durante il test di creep a sforzo σ_C costante, la deformazione $\varepsilon_C(t)$ misurata nel tempo può essere correlata al danno accumulato dalla riduzione della rigidezza (secante o di scarico) $E^*(t)$. Il parametro di danno a rottura è $D_C(t_4)=1$. (b) A causa del creep, una rottura fragile può scaturire anche in materiali duttili dalla nucleazione e dalla colaescenza di microcricche a bordo grano a seguito di fenomeni induttivi quali la formazione di wedge cracks e microcavitazione.

Gli odierni trends di sviluppo promuovono materiali per alte temperature sempre più performanti e complessi, sia da costruire che da gestire. Gli acciai martensitici 9-12 Cr (es. P91, P911 e P92) introdotti negli ultimi 20 anni per impianti di potenza a carbone ultra super critici (T~630°C e p ~30 MPa) ne sono un esempio [4]. In tale caso, la metallurgia è totalmente diversa rispetto ai citati acciai ferritici e le proprietà di resistenza al creep si devono alla precipitazione di carburi $M_{23}C_6$ a bordo grano e alla dispersione fine di carbo-nitruri MX (i.e. M = V,Nb e X

= C,N) visibile solo al microscopio elettronico (SEM o TEM). Il degrado strutturale durante il funzionamento ad alte temperature avviene in questi materiali attraverso meccanismi peculiari più subdoli, quali la colaescenza dei carburi $M_{23}C_6$, la precipitazione delle fasi intermetalliche di Laves $(Fe,Cr)_2(Mo,W)$, e la formazione delle Z-phases a spese dei carburi MX. In questo caso, si possono impiegare repliche metallografiche di tipo estrattivo ma il danno richiede la valutazione off-site al microscopio elettronico.

Un altro esempio è costituito da acciai austenitici HP grade ad alto tenore di Ni (~35%) e Cr (~25%) usati nell'industria petrolchimica per i tubi catalitici di *steam reforming* per la produzione di idrogeno in condizioni operative tra 850-900 °C [5]. I meccanismi di degrado rilevati su tubi della sezione radiante del forno catalitico eserciti per 85.000-95.000 *h* sono discussi in dettaglio dagli autori in un'altra memoria di questo convegno. In questa sede si osserva solamente che il danno microstrutturale nel bulk del materiale è riconducibile all'indebolimento su scala sub-micrometrica della rete di carburi a bordo grano (e.g. cavitazione e insorgenza di G-phase), con conseguente infragilimento.

In sintesi, il controllo non distruttivo del danno in acciai più recenti e meno noti, quali gli acciai martensitici e austenitici citati a titolo di esempio, non può essere condotto secondo i principi di Neubauer ma è più complesso e costituisce oggetto di ricerca. Un forte ostacolo allo sviluppo di metodiche di controllo efficaci risiede anche nella limitata conoscenza dell'evoluzione microstrutturale dei nuovi acciai resistenti al creep, che esigono un'accurata e dispendiosa sperimentazione continuativa di durata (pluri)decennale (e.g. 100´000 *h*, 200´000 *h*) per l'effettiva valutazione delle modifiche microstrutturali indotte. Tale valutazione è necessaria anche per calibrare o validare i consueti modelli di regressione statistica usati per modellare (i.e. estrapolare) a fini progettuali il comportamento dei materiali a lungo termine da prove brevi o accelerate. Questa difficoltà è particolarmente rilevante in considerazione delle attuali tendenze progettuali volte ad aumentare la vita utile dei componenti di impianto ben oltre le 100´000 *h* (e.g. vedi parti 2 e 3 della "prEN 12952: Water-tube boilers and auxiliary installations" che sostituirà la precedente versione del 2001), anche per ragioni di sostenibilità ambientale.

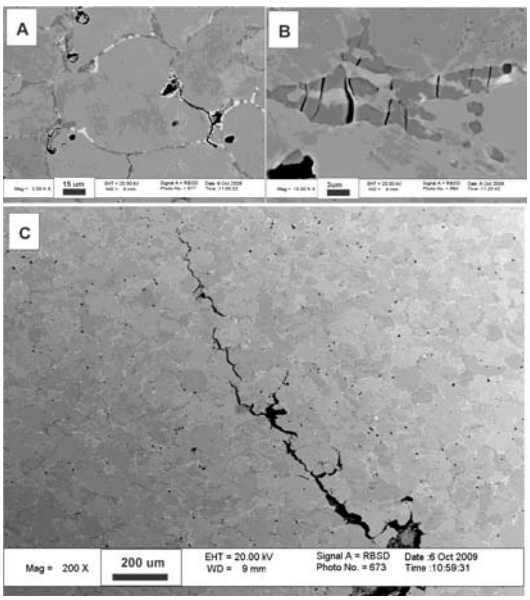


Figura 2. Danno in un HP steel austenitico $Ni_{35}Cr_{25}$ dopo circa 90'000 h di servizio, osservato su un sezione trasversale di un tubo dopo messa fuori esercizio e test distruttivo. Il network di carburi di Cr-Nb rappresenta il sistema rilevante ai fini dell'evoluzione del danneggiamento, come dimostrano le microcricche ed i microvuoti osservati in molti punti. (a) Microcricche da creep lungo il network. (b) La natura fragile dei carburi rivelata da cricche sub-micrometriche. (c) Macrocricca intergranulare formata per coalescenza di decine di microcricche nel network danneggiato a seguito di un test di trazione post-esercizio.

In questo scenario si evidenzia la mancanza di modelli teorici di danno universalmente accettati, che abbiano un adeguato potere predittivo e possano essere utili per coadiuvare lo sviluppo e la gestione degli acciai innovativi. Esiste, infatti, un "gap" in tal senso poichè la modellazione del fenomeno di danneggiamento è un problema particolarmente complesso da un punto di vista matematico. Nel seguito si evidenziano alcuni aspetti di modelli microstrutturali di nuova generazione, al fine di evidenziarne la potenzialità nello studio dei fenomeni di rottura fragile dovuta a microcricche.

2. MODELLI DI DANNO

La gestione del danno si basa sulla stima della vita residua del materiale, che richiede una valutazione affidabile del danno accumulato durante il servizio. Tuttavia non esiste ad oggi un modo fisicamente fondato di ottenere tale stima in generale. Nella citata prEN 12952, ad esempio, viene utilizzato un approccio tipico per fenomeni rate-dependent e basato su una legge lineare di accumulo di danno

$$D_C(t) = \sum_{i}^{T-PERIODI} \frac{\Delta t_i}{t_{C_i}(T,p)} \qquad (1)$$

dove D*C(t)* è il parametro di danno da creep, posto pari alla somma al tempo *t* di tutte le frazioni *i*-esime $\Delta t_i / t_{Ci}$ ottenute dal rapporto tra il tempo di esposizione Δt_i alla temperatura *T* (o alla pressione *p*) e la vita a creep attesa t_{Ci} *(T,p)* del materiale (in forte analogia al criterio di Miner usato per il danno da fatica). Tale criterio è evidentemente convenzionale e non ha alcun riferimento con la microstruttura ed i fenomeni evolutivi che controllano realmente la cinetica del danno e, quindi, la vita residua di un dato materiale.

Nella meccanica dei solidi il fenomeno del danneggiamento non può generalmente essere ricondotto alla meccanica della frattura, in cui si considera l'evoluzione di una sola cricca. Il problema della rottura fragile dei materiali dovuto a microcricche diffuse, che raggiunta una densità critica coalescono creando una macrocricca, è riconducibile invece alla definizione dell'appropriato parametro di danno *DC* che incapsuli la complessità del processo stocastico di danneggiamento e descriva la riduzione delle proprietà elastiche. Il legame costitutivo, nella sua forma scalare più semplice, è espresso come

$$\sigma_C = E_0 \left[1 - D_C(t)\right] \varepsilon_e(t) \ , \qquad (2)$$

dove E_0 è il modulo di Young iniziale $\varepsilon_e(t)=\varepsilon_{TOT}(t)-\varepsilon_C(t)$ è la deformazione (elastica) ed E*(t) è il modulo secante istantaneo misurabile durante lo scarico. Si osserva che tale formulazione fu proposta la prima volta da Kachanov nel 1958 proprio nell'ambito dello studio delle rotture fragili causate dal creep [6,7]. Con riferimento alla Figura 1a, l'equazione (2) afferma che il danno è pari al decremento normalizzato di rigidezza $D_C = \Delta E^*(t)/E_0$ e varia da 0 (in assenza di danno) a 1 (a rottura). Questa formulazione può essere usata per rotture fragili in generale - anche di natura statica - riscrivendo in tutta generalità

$$\sigma = E^*(D)\varepsilon_e = E_0(1-D)\varepsilon_e \ , \quad (3)$$

dove *D* è inteso come il parametro di danno appropriato. Nonostante la sua semplicità la determinazione di *D* si è rivelata ardua. I modelli della meccanica del continuo e la micromeccanica alla base del metodo agli elementi finiti – lo standard industriale per la modellistica odierna – di solito riescono a riprodurre efficaciemente il fenomeno di creep solo fino al regime secondario, quando non si verifica la formazione di cricche o comunque fino a quando la densità di microcricche è bassa. Allora non è necessario prendere in considerazione esplicitamente il parametro di danno. Viceversa, nel creep terziario, molti di questi modelli mostrano limitazioni legate al fatto che schematizzano macroscopicamente il materiale danneggiato come un solido continuo, senza risolvere le singole microcricche. L'interazione tra queste ultime, tuttavia, è cruciale per la localizzazione del danno precedente alla rottura e per la determinazione di *D* durante tutto il processo. A tal fine la diretta considerazione della microstruttura e delle microcricche è indispensabile.

La crescente potenza computazionale a disposizione del calcolo numerico ha promosso negli ultimi anni la ricerca di nuovi approcci basati su modelli microstrutturali che prendessero

in considerazione il danneggiamento a bordo grano nei materiali policristallini. Sebbene questi tentativi siano ancora ad uno stadio concettuale, il loro potenziale è indubbio. Come esempio, si analizzano nel seguito alcuni risultati ottenuti con modelli microstrutturali secondo l'approccio della meccanica statistica del danneggiamento.

3. LA STATISTICA MECCANICA DEL DANNEGGIAMENTO E LA DEFINIZIONE RAZIONALE DEL PARAMETRO DI DANNO

La meccanica statistica del danno (SDM - statistical damage mechanics), ribaltando il punto di vista della meccanica del continuo, propone un approccio "bottom-up" che presuppone la conoscenza della microstruttura e delle sue proprietà morfologiche e meccaniche, nonchè la concoscenza dei fenomeni di degrado attivi sulla microscala. Questi modelli non ammettono di norma soluzioni chiuse ma prediligono un approccio squisitamente numerico in ragione dell'elevato numero di equazioni da risolvere. I risultati ottenibili con le simulazioni sono molto dettagliati e si prestano ad una elaborazione statistica accurata che consente l'identificazione fisicamente motivata del parametro di danno.

Assumendo che la formazione di ogni singola microcricca possa essere conosciuta, per quanto detto in precedenza, la definizione di *D* potrebbe scaturire dalla seguente relazione

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta E_i}{E_0}. \qquad (4)$$

Purtroppo tale determinazione non è ovvia in quanto i termini $\Delta D_i = \Delta E_i / E_0$ non sono noti a priori ma sono variabili aleatorie, dipendenti in primis dalla microstruttura e dal carico applicato. Solo di recente il problema è stato risolto esattamente per la prima per il semplice modello SDM illustrato in Figura 3 [8-11]. Esso mostra una microstruttura policristallina bidimensionale approssimata come una tasselazione (detta di Voronoi) disordinata di poligoni convessi. A quest'ultima viene associato per costruzione un network duale (detto di Delaunay), in cui ogni nodo rappresenta un grano ed ogni segmento un bordo di grano. Inoltre, per materiali con limitata duttilità in cui l'interazione fra grani limitrofi è prevalentemente elastica finita, un comportamento meccanico lineare elastico è attribuito a questi segmenti, considerandoli come molle, aventi tutte costante *k* ma deformazioni massime ε^* diverse e assegnate casualmente (ref. [11] per dettagli). La formazione di microcricche in questo schema consiste nella rottura di dette molle, come mostrato in Figura 3b. Questa rappresentazione fornisce in sostanza un modello microstrutturale di prima approssimazione, sia per i ferritici che per materiali più avanzati come gli HP-grade steel austenitici (ref. Figura 2) o quelli martensitici 9-12 Cr. L'idea di fondo è quella di focalizzare lo studio sul comportamento del network meccanico che controlla la rottura fragile della microstruttura, vale a dire la rete dei bordi grano.

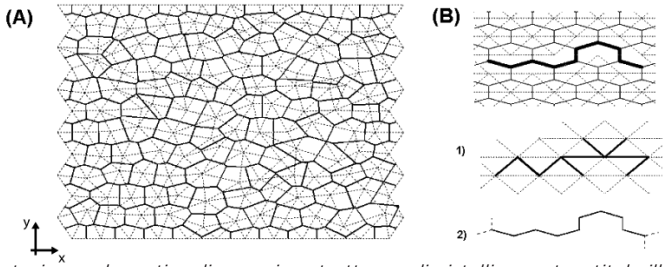


Figura 3. Rappresentazione schematica di una microstruttura policristallina usata a titolo illustrativo per lo studio statistico e microstrutturale del danno. (a) Il modello morfologico associato alla microstruttura reale può essere derivato come tasselazione di Voronoi, alla quale resta associato un network di Delaunay. (b) Rappresentazione di una microcricca nelle rappresentazione di Voronoi e Delaunay rispettivamente.

Accurate simulazioni di tests di trazione su questo modello hanno consentito di scomporre il processo di danneggiamnto in "costituenti" elementari, identificando sulla microscala tutte le variabili rilevanti per *D* e le loro mutue interazioni. Ne è scaturita una formulazione razionale che specializza l'espressione (4) come

$$D(\bar{\varepsilon}) = \frac{k}{E_0}\left(\frac{\ell}{L}\right)^2 \left[\sum_{i=1}^{n(\varepsilon)} \left(1+\eta_p\right)\left(\frac{\varepsilon_i^*}{\bar{\varepsilon}}\right)^2\right] \qquad (5)$$

in cui l / L è il rapport tra la dimensione media del grano e la dimensione complessiva del network simulato, mentre η è un parametro di ridistribuzione dell'energia elastica caratteristico della microstruttura e dipendente dal numero di coordinazione dei grani (i.e. il numero medio di bordi grano) e dall'orientamento del bordo grano rispetto al carico applicato. Inoltre il parametro cinematico $\varepsilon^* / \bar{\varepsilon}$ rappresenta il rapporto tra la micro-deformazione critica di una molla rotta (cioè una microcricca formata a bordo grano) e la corrispondente deformazione macroscopica $\bar{\varepsilon}$ imposta durante il test. Rimandando agli articoli originali per la derivazione matematica ed una discussione esaustiva, ci si limita qui solamente a sottolineare che il computo di *D* si riduce in tal modo alla determinazione delle tre micro-variabili random η, $\varepsilon^*(\bar{\varepsilon})$, $n(\varepsilon)$ Il fatto che tali variabili siano aleatorie potrebbe scoraggiare a prima vista ma non rappresenta un problema irrisolubile. Infatti, esse hanno una "struttura" statistica ben definita che permette il calcolo di funzioni di correlazione e perfino la formulazione di soluzioni approssimate in forma chiusa (i.e. analitiche) [10,11]. Il principale merito di questo modello razionale risiede appunto nell'aver rivelato la struttura matematica del processo di danneggiamento fragile.

Un vantaggio notevole dell'approccio bottom-up è l'inerente capacità di riprodurre il fenomeno di danno sia prima che dopo la sua localizzazione. In Figura 4a viene mostrata la risposta a trazione di un modello microstrutturale contenente ~600 grani. La massima resistenza statica si ottiene in corrispondenza della localizzazione del danno a $\bar{\varepsilon}$ = 2.7 10-3, contraddistinta da una marcata perdita di capacità di carico e un'*avalanche* (valanga) di microcricche.

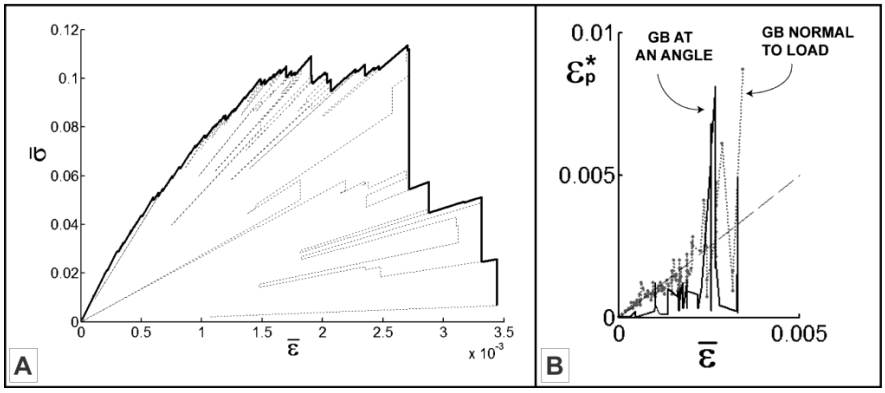


Figura 4. (a) Risposta sforzo-deformazione simulata (la scala degli sforzi è arbitraria). Linee punteggiate indicano la presenza di avalanche di microcricche. Una vasta avalanche ha luogo a $\bar{\varepsilon}$ = 2.7 10-3 , indicativa della localizzazione del danno e corrispondente al picco di risposta. (b) Deformazioni critiche ε^*_p vs. $\bar{\varepsilon}$ delle molle rotte (i.e. GB) ripartite in due gruppi, sulla base dell'orientamento relativo al carico. GB normali al carico sono più soggetti al danneggiamento prima della localizzazione poichè sopportano la maggior parte del carico. Dopo la localizzazione, il danneggiamento procede lungo GB comunque orientate e comunque resistenti.

Monitorando $\varepsilon^*(\bar{\varepsilon})$ durante tutta la simulazione, si vede in Figure 4b che bordi di grano (GB) diversamente orientati rispetto al carico partecipano in misura differente al processo di danneggiamento, essendo quelli normali alla direzione di tiro principalmente esposti. Tuttavia, si vede bene dal grafico come, allorchè il danno si localizza, la propagazione della macrocricca avvenga lungo bordi di grano comunque orientati. La transizione è resa visivamente in Figure 4b da una "esplosione" nella dispersione dei valiori $\varepsilon^*(\bar{\varepsilon})$.

Il meccanismo fisico che la sottintende può essere ricondotto all'amplificazione degli stress in seno alla microstruttura indotta dal danno accumulato fino a quel momento e dalla conseguente ridistribuzione del carico. Si consideri in proposito un network triangolare perfetto, costituito da molle orientate orizzontalmente a 0° o diagonalmente a 3 60° e sottoposto a

trazione a 0°. I bordi di grano diagonali sono inizialmente soggetti ad uno sforzo nullo fino al sopraggiungere della prima rottura di una molla a 0° (i.e. una prima microcricca) che produce una sovrasollecitazione su di essi. La Figura 5 mostra questo effetto in termini di perturbazione percentuale della deformazione sulla generica ij-esima molla (non rotta e posta tra l' *i*-esimo e il *j*-esimo grano)

$$\% \; Strain \; Perturbation = \frac{\varepsilon_{(ij)} - \varepsilon_{(ij)}^{REF}}{\varepsilon_{(ij)}^{REF}} \times 100 \quad , \qquad (6)$$

dove $\varepsilon_{(ij)}^{REF}$ è la deformazione di riferimento in assenza di danno. Evidentemente l'entità della perturbazione si riduce allontanandosi dalla microcricca arbitrariamente introdotta ma i valori massimi per i bordi di grano diagonali sono elevati - nell'ordine del 1000-10000 % - contro un modesto 20% per le molle orizzontali. Una simile amplificazione del campo di deformazione sembra quindi verosimilmente capace di promuovere rotture anche nei bordi di grano diagonali, che sarebbero altrimenti debolmente sollecitati. La probabilità di nucleare microcricche ai bordi sfavorevolmente orientati aumenta al crescere della densità delle microcricche, fino al punto in cui il modo di danneggiamento originario cambia completamente ed ha luogo una transizione improvvisa verso un danneggiamento che coinvolge qualunque bordo di grano, indipendentente dal suo orientamento.

La diversa propensione al danno dei bordi grano secondo il loro orientamento relativo al carico è alla base dell'anisotropia elastica indotta dal danno, una delle questioni più complesse da un punto di vista modellistico. Infatti, per quanto detto, la riduzione delle proprietà elastiche conseguente al danno si ha solo su quelle costanti del tensore di rigidezza sensibili ai bordi grano che effettivamente partecipano al processo di danneggiamento. Così i moduli elastici in direzioni diverse da quelle del test di trazione potrebbero essere solo leggermente influenzati. L'evoluzione anisotropa del danno è ben percepibile dall'osservazione delle macrocricche finali mostrate in Figura 6 ed ottenute per diversi schemi di carico uniassiali.

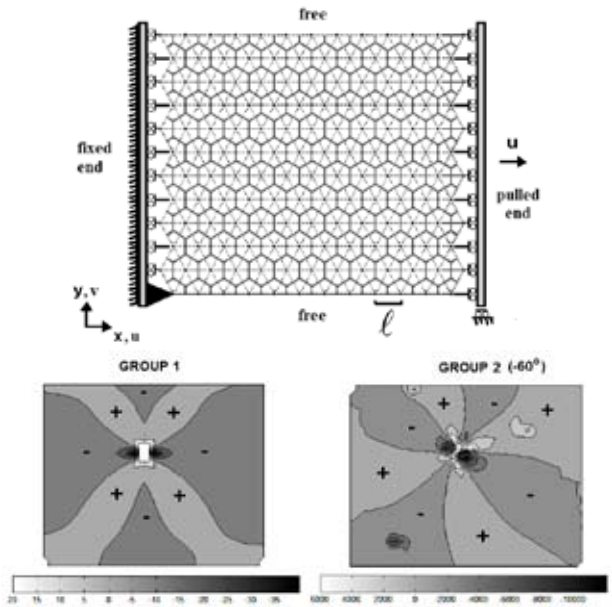


Figura 5. Network triangolare soggetto a trazione a 0° e campi di perturbazione percentuale indotti da una sola rottura orizzontale sulle molle integre orizzontali (Group 1) e su quelle diagonali (Group 2) per un modello con ~600 grani.

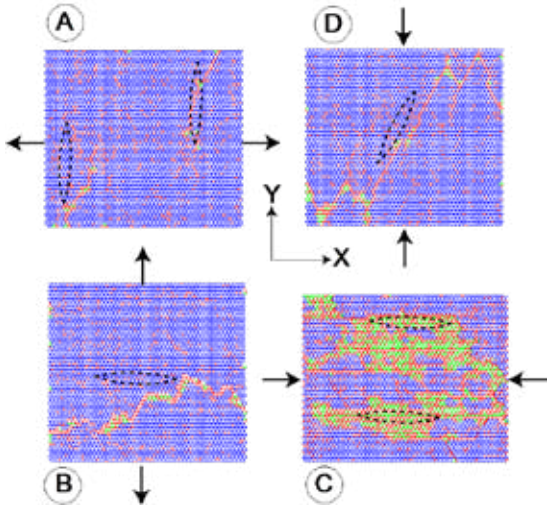


Figura 6. Fronti di rottura indotti dai 4 tipi di carico indicati ed associati a 4 differenti modi di rottura.

Tornando al problema del creep, anche se i risultati illustrati in questo paragrafo si riferiscono al caso statico, l'approccio SDM si estende in modo semplice a problemi dipendenti dal tempo. Infatti, sebbene non sia stato ancora condotto uno studio specifico sul creep, il modello discusso poc'anzi è stato già usato per studiare il danneggiamento da fatica [12]. La semplice aggiunta di una legge di Basquin di accumulo del danno sulla microscala, ha consentito di ottenere sulla macroscala la tipica relazione di Coffin-Manson, assieme alla corretta previsione della dispersione della resistenza a fatica ed agli effetti della dimensione del campione sulla vita a fatica. Da notare anche che da tale studio è scaturita una definizione del parametro di danno D_F riconducibile ad un meccanismo di danno di tipo "weak link". Infine, tale modello "augmented" si è dimostrato capace di cogliere simultaneamente più meccanismi di danno, riproducendo la transizione tra i due modi di rottura risultanti dalla fatica a basso carico (somigliante ad un test di trazione ad alta velocità di deformazione e dominato dall'accumulo di danno statico) e dalla fatica ad alto carico (governata dal lento accumulo di danno da fatica), come mostrato in Figura 7. In ragione delle similarità tra fatica e creep, si può anticipare che l'estensione di questo stesso modello al creep sarebbe piuttosto semplice e consisterebbe nell'assegnare una ulteriore meccanismo di deformazione/danno microstrutturale a bordo grano con la corretta cinetica.

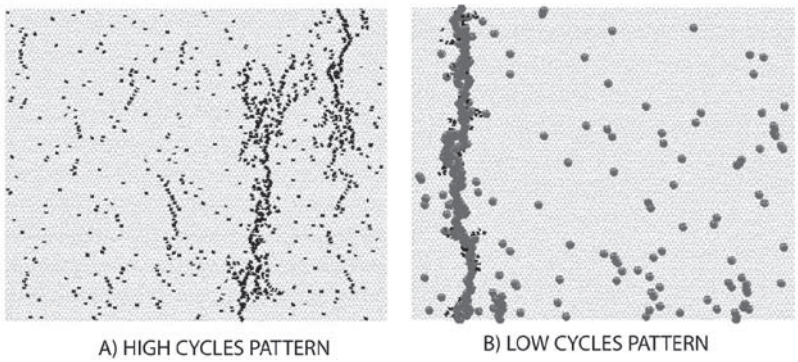


Figura 7. Fronti di danneggiamento a fatica dipendenti dal livello di sforzo: (a) alti cicli (i.e. basso stress); (b) bassi cicli (i.e. alto stress). Le microcricche di fatica sono segmenti scuri mentre le rotture statiche sono cerchi.

4. CONCLUSIONI

Seppur ad uno stadio di sviluppo concettuale, il livello di approfondimento garantito dall'approccio SDM dei fenomeni cooperativi che sottointendono al danneggiamento fragile è indubbio e generalmente non conseguibile con la sola meccanica del continuo. Ciò non implica alcuna superiorità di un approccio rispetto all'altro in termini assoluti. Piuttosto suggerisce una possibile sinergia tra i due metodi volto allo sviluppo di metodi di calcolo multiscala ibridi. Del resto, a meno che non divenga possibile risolvere routinariamente sistemi di miliardi di equazioni, sembra improbabile che SDM o altri approcci microstrutturali possano realisticamente competere come strumento di progettazione strutturale stand-alone. E anche quando ciò fosse possible, un approccio di progettazione tanto dettagliato e a forte connotazione numerica sarebbe poco pratico ed errato. Invece, sarebbe auspicabile cercare di implementare questi modelli nella logica modulare e multiscale citata prima. La modellazione microstrutturale deve essere considerata attualmente come una possibile strada per arrivare, dopo appropriato sviluppo, ad ottenere strumenti previsionali per la stima della vita residua di acciai eserciti ad alte temperature e per elevare la resistenza a creep dei nuovi materiali attraverso l'ottimizzazione della microstruttura ed il rafforzamento dei bordi grano.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] B. Neubauer, U. Wedel: "Advances In Life Prediction Methods", ASME conference, Albany,307, 1983.

[2] ISPESL, Raccolta VSR. Specificazioni tecniche applicative del DM 21 novembre 1972 e successive modifiche per la verifica della stabilità dei recipienti a pressione. Ed. 1999, isbn: 8824036910.

[3] Linee Guida ISPESL, LG/creep sezione 6: repliche metallografiche.

[4] J. Hald: "Creep resistant 9-12% Cr steels - Long-term testing, microstructure stability and development potentials", ECCC Creep Conference, 12-14 September 2005 London, UK.

[5] L.H. De Almeida, A.F.Ribeiro, I. Le May "Microstructural characterization of modified 25Cr–35Ni centrifugally cast steel furnace tubes", Mater. Charact. 2003, vol. 49, 219-229.

[6] L.M. Kachanov: Introduction To Continum DamageMechanics, Martinus Nijhoff publishers, Netherlands, 1986.

[7] D. Krajcinovic: Damage mechanics. North-Holland, Amsterdam, The Nederlands, 1996.

[8] A. Rinaldi, D. Krajcinovic, S. Mastilovic : "Statistical Damage Mechanics and Extreme Value Theory", Int. J. Damage mechanics 2007, 16, 1.

[9] A. Rinaldi, D. Krajcinovic, P. Peralta, Y.C. Lai: "Modeling Polycrystalline Microstructures With Lattice Models: A Quantitative Approach", Mech. Mater. 2008, 40, 17-36.

[10] A. Rinaldi, Y.C. Lai: "Damage Theory Of 2D Disordered Lattices: Energetics And Physical Foundations Of Damage Parameter", Int. J. Plasticity 2007, 23, 1796-1825.

[11] A. Rinaldi, "A rational model for 2D Disordered Lattices Under Uniaxial Loading", Int. J. Damage Mech., 18; 2009, 233-57

[12] A. Rinaldi, P. Peralta, D. Krajcinovic, Y.C. Lai: "Prediction Of Fatigue Properties with Discrete Damage Mechanics", Int. J. Fatigue 2006, 28, 1069–1080.

sessione POSTER

14
Tecnologie diffrattometriche alla nanoscala: nuove frontiere di sviluppo e normazione

*G. Berti**
*F. De Marco***
*E. Tolle****

**Università di Pisa*
***XRD-Tools s.r.l,*
****Ansaldo Energia*

SOMMARIO

Le tecnologie nanodiffrattometriche sono note da molti anni; hanno la prerogativa di essere le sole capaci a prelevare dal materiale irraggiato le informazioni alla scala dei nanometri e, di conseguenza, realizzare misure reticolari. Queste particolari caratteristiche sono oggi l'innesco per una rinnovata vitalità in relazione alla loro utilizzabilità in loco. E' percepito un significativo interesse industriale e civile andare oltre la caratterizzazione analitica dei materiali basata sulla definizione generale delle proprietà chimico-fisiche e la dimensionalità cristallografica; esperimenti condotti mediante simulazione in laboratorio (cosi dette "in situ"), di condizioni differenti rispetto a quelle ambientali (e.g. temperatura, pressione, carico meccanico, etc.) sono indicative di una certa reologia reticolare alle sollecitazioni. Esse tuttavia sono diverse dalle effettive condizioni di lavoro o servizio. Ne segue che le tecnologie nanodiffrattometriche sono le sole che possono eseguire misure reticolari sul posto ("in loco"). Partendo dalla trasformazione concettuale in atto tra caratterizzazione del materiale in laboratorio e sua qualificazione per l'uso e/o riqualificazione per il suo mantenimento in uso, il lavoro introduce alcuni aspetti tecnologici innovativi con ampia ricaduta normativa nei prossimi dieci – venti anni. Uno dei fattori limitanti delle tecnologie diffrattometriche è l'ingombro legato alla concentrazione di dispositivi su un cerchio meccanico. Delineiamo qui un metodo per l'eliminazione di detto ingombro, fatte salve le prerogative nano diffrattometriche di base; la metodica dei neutroni è presa ad esempio perché esprime il più alto livello di utilizzabilità a scopi diagnostici industriali e civili quando le misure reticolari devono essere ottenute da porzioni d'impianti e manufatti a profondità superiori al decimo di millimetro. I sistemi di confinamento non sono qui trattati ma la loro discussine è depositata altrove. La tecnologia denominata a goniometro virtuale si applica anche altre metodiche.

1. INTRODUZIONE.

Recenti significativi sviluppi della tecnologia diffrattometrica alla scala nanometrica hanno proiettato in un paio di decadi la metodica in un orbita di utilizzabilità nemmeno sospettabile prima. Il presente lavoro estende ai neutroni i concetti espressi nel "Dossier delle Prove non distruttive" promosso da UNI [1]. La diffrazione a raggi x e la diffrazione a neutroni sono tecnologie diffrattometriche dotate di similarità e differenze. Le similarità sono basate sulle proprietà ondulatorie dei flussi di fotoni x e neutroni. I termini assorbimento, attenuazione , assorbimento e sezione d'urto hanno significato differente, ma sono correlati; tutti descrivono i meccanismi

d'interazione tra radiazione e materia. Questi stessi termini, che descrivono l'interazione fasci di particelle –materiali, sono anche alla base del diverso comportamento dei fasci di particelle x e di neutroni, quando interagiscono con materiali, organizzati in reticoli atomici e con una varietà di gradi di aggregazione. Nel caso dei raggi x, il coefficiente di attenuazione lineare (μ) dipende dall'energia del fascio incidente e dalle caratteristiche del materiale attraversato; per un fascio collimato di neutroni, è possibile definire un coefficiente di attenuazione lineare, ma con una probabilità molto più bassa di collisione dei neutroni con le particelle presenti lungo la traiettoria e, dunque, con una penetrazione più profonda dei materiali. Questa diversa penetrabilità è una delle differenze citate ma rende le due metodiche complementari in una visione di totale efficacia ispettiva nel campo della diagnostica precoce. I tipi di analisi diffrattometri che, indirizzate alla determinazione delle tensioni residue, delle microstrutture e di altre caratteristiche strutturali dei materiali, offrono informazioni complementari ed hanno schemi procedurali sovrapponibili sia per le strategie di raccolta dei dati, sia per le calibrazioni ed il monitoraggio delle prestazioni strumentali, sia per l'interpretazione dei risultati ed il passaggio da spettro di diffrazione a proprietà del materiale.

Sviluppi tecnologici di fine secolo scorso, nel campo della diffrattometria a raggi x, hanno oggi portato a definire un quadro ben assestato sui tre distinti livelli d'intervento normativo: i) coerenza del metodo XRD (da materiali policristallini) con i metodi NDT tradizionali, ii) applicazione dei metodi di test, iii) specifiche tecniche applicate alla produzione ed ai processi. In questo quadro, la qualità raggiunta dalla tecnologia XRD, ha permesso d'introdurre, sia pure a diverso livello normativo/informativo concetti metrologici (e.g. EN13925-3, EN15305), [2], [3]. Occorre anche aggiungere che la tecnologia degli anni novanta, largamente basata sui diffrattometri di tipo Bragg Brentano, confinava le analisi ai laboratori di ricerca o ai laboratori centrali delle maggiori industrie. Oggi, i nuovi e più recenti sviluppi tecnologici, le prove di concetto realizzate, indicano che gli stessi livelli e gli stessi principi di cui sopra possono essere estesi alle tecnologie che operano fuori da detti centri e laboratori. Le nuove frontiere di sviluppo e formazione traggono spunto proprio da questi recenti avanzamenti ed indicano la utilità e la tempestività di una norma che estenda quanto già descritto nei documenti CEN/UNI delle serie 13925 [4], [5], [6] ed affini alle pratiche analitiche ed ispettive da eseguire fuori dai laboratori. Se queste buone pratiche possono essere estese alle diagnosi sui componenti in esercizio, la formalizzazione del metodo diffrattometrico, come prova non distruttiva in senso stretto, non sarà più solo un fatto tecnologico e scientifico.

La specifica tecnica sulla determinazione delle tensioni residue attraverso diffrazione a neutroni ISO/TS 21432, [7] sviluppata nel contesto internazionale, che ha visto l'Imperial College di Londra (UK), il NIST di Gathersbourg (Washinton, D.C.) ed il Joint Research Centre di Petten (NE.) tra i maggiori protagonisti, può trarre benefici da questa nuova impostazione ed è nel raggio d'interesse del CEN/TC138/WG10. I più recenti raggiungimenti scientificie e tecnologici in termini di confinamento e moderazione energetica del fascio, portano ad una seria considerazione di fattibilità la realizzazione di strumentazione a neutroni da usare fuori dai laboratori grandi macchine e dai siti di sorgenti ad alto flusso di neutroni (reattori).Incoraggiare gli sviluppi tecnologici in questo settore significa dare impulso alla trasformazione dei risultati di ricerca, al trasferimento della conoscenza al servizio della società.

2.DIFFRAZIONE A RAGGI X E DIFFRAZIONE A NEUTRONI

Quando si manifestano fenomeni di criticità di progetto o di esercizio a profondità non raggiungibili dai raggi x, la diffrazione a neutroni (ND) è una metodologia complementare con potenzialità soddisfacenti. Sia la XRD, sia la ND sono tecnologie ben consolidate nei laboratori di ricerca. La prima ha una diffusione maggiore della seconda per motivi di flusso minimo di particelle necessarie alla diffrazione; inoltre i raggi x sono più facile da ottenere e a più basso costo dei neutroni che sono generati da reattori nucleari o negli acceleratori di particelle. Inoltre la seconda coinvolge sistemi di sicurezza e di radioprotezione ad un livello di rischio più impegnativo. Tuttavia recenti avanzamenti tecnologici ottenuti sia nella XRD sia nella ND, possono esaltare la loro attitudine a rilevare la presenza di tensioni residue, tessiture/ microdeformazioni e dimensioni di domini micro-nano- strutturati [8], [9], [10].

Limitatamente alle tensioni residue, i metodi di test sono già stati oggetto di normativa internazionale sia per quanto riguarda i raggi x (EN15305), [3], sia per quanto riguarda i neutroni [7].

Ciò che ancora sfugge all'assetto normativo internazionale, ed è invece un elemento di fondamentale importanza per l'impiego industriale e civile, già nel presente ed ancor di più in futuro, ed è loro utilizzabilità in campo, on site. Gli avanzamenti tecnologici detti, specialmente nel campo ND consento di utilizzare sorgenti in cui l'emissione di neutroni ha una controllabilità on/off. Indipendentemente da XRD e/o ND, detta utilizzabilità on site è governata da tre concetti fondamentali:

1. Invasività della radiazione
2. Distruttività della prova
3. Qualificabilità del materiale ispezionato

La **invasività** della radiazione per scopi diffrattometrici è praticamente nulla in quasi tutte le applicazioni di metallurgia industriale; quando così non fosse, servirà definire frequenze, intensità e tempi d'irraggiamento in modo che gli effetti indotti sul materiale irraggiato siano transienti e removibili dopo l'interazione.

La **non distruttività** della prova è un effetto intrinseco alla tecnologia. I dispositivi che riescono a fare diffrazione in campo, senza contatto con il materiale, realizzano prove non distruttive in senso stretto.

La **qualificabilità** è una conseguenza dei precedenti due punti. Occorre precisare che la qualificazione del materiale per l'uso di destinazione non equivale alla caratterizzazione del materiale intrinseco, bensì alla sua "caratterizzazione applicata" al materiale di quel componente nel contesto d'uso dell'impianto.

È ben noto che la definizione delle specifiche tecniche di un materiale è cosa diversa e ben più restrittiva delle caratterizzazioni fisica, chimiche, cristallochimiche, metallografiche o mineralogiche del materiale, astratte dal contesto d'uso.

Nella geometria dei diffrattometri a raggi x si riconoscono i diversi elementi costitutivi: tubo a raggi x, fascio incidente e diffratto, il cerchio del goniometro e di focalizzazione, l'angolo di uscita del fascio x, il porta campione, di solito piatto, posto sul centro fisso del goniometro, le fenditure di confinamento del fascio e le adiacenti fenditure di divergenza; poi ancora la geometria è costituita dal cerchio di focalizzazione che interseca il cerchio del goniometro con la fenditura di ricezione., l'eventuale cerchio del monocromatore ed il rivelatore. La caratteristica configurazione del diffrattometro Bragg Brentano impone che vi sia equidistanza tra centro della sorgente, centro del campione e centro della fenditura di ricezione. Questo vincolo impone anche che il cerchio di focalizzazione cambi il suo raggio ed il suo centro durante il movimento del rivelatore sul braccio del goniometro.

C'e anche da aggiungere che la configurazione Bragg Brentano ha un'apparente facilità d'uso che tuttavia si scontra con un certo numero di effetti strumentali e sperimentali che di seguito saranno denominati "contributi strumentali". Detta facilità d'uso ne ha permesso una larga diffusione ed approfondimenti teorici significativi sin dagli anni sessanta [11], ma anche una certa complessità interpretativa [12].

La configurazione Bragg Brentano si applica anche alla radiazione neutronica; Tuttavia, in questo caso alcune modifiche devono essere apportate per tener conto delle caratteristiche di moto dei fascio neutronico.

Il neutrone e' una particela di massa m= 1.675×10^{27}kg, spin 1/2 e momento magnetico μ= 1.913 nm. Il moment **p**, la velocità **v**, il vettore d'onda **k** e la lunghezza d'onda del neutrone sono collegati tra loro dalla relazione di de Broglie: **p**=h**k** (h=$6{,}626 \times 10^{-27}$erg sec è la costante di Plank) e dalla relazione $\mathbf{k}=2\pi/\lambda$. Così la lunghezza d'onda del neutrone può essere espressa in termini di energetici, ovvero $\lambda=0{,}286\ E^{-1/2}$. Dunque, per gli scopi della diffrazione, che rispetti l'equivalenza dimensionale tra lunghezza d'onda della radiazione e distanza dei piani in un reticolo (legge di Bragg), è possibile identificare le caratteristiche energetiche di una banda spettrale di neutroni; questa banda deve avere lunghezze d'onda dello stesso ordine di grandezza della spaziatura reticolare della maggior parte dei materiali d'interesse industriale e che siano stabili a temperatura ambiente. Questa categoria di neutroni, denominati neutroni termici, a 300K, ha un'energia intorno a 25 meV ed una lunghezza d'onda di circa 1.8 Å. La Figura 2 mostra lo

schema di un diffrattometro a Neutroni correntemente usato nei laboratori in cui sono presenti grosse macchine acceleratici capaci di fornire neutroni ad alto flusso, CEN ISO/ 21432, [7], [8].

I termini assorbimento, attenuazione e sezione d'urto hanno significato differente ma sono correlati. Tutti e tre descrivono i meccanismi d'interazione tra radiazione e materia. Nel caso dei raggi x il coefficiente di attenuazione lineare (μ) dipende dall'energia del fascio incidente e dalle caratteristiche del materiale attraversato; indica l'energia assorbita e quella diffusa durante l'interazione:

$$\mu = \mu_a + \mu_d \qquad (1)$$

Dove i pedici a e d distinguono tra il coefficiente di assorbimento (μ_a) ed il coefficiente di diffusione (μ_d) rispettivamente. Il primo indica la probabilità che l'energia incidente sia assorbita e trasformata in energia cinetica degli elettroni secondari prodotti nell'interazione. Il secondo indica la probabilità che l'energia incidente del fotone sia trasformata in energia diffusa dei fotoni secondari. Durante l'interazione i fotoni interagiscono con la nuvola elettronica e producono diffusione Compton, diffusione Rayleigh, effetto fotoelettrico; nell'interazione col nucleo producono reazioni fotonucleari e produzione di coppie.

Per un fascio collimato di neutroni, è possibile definire un coefficiente di attenuazione lineare composto dai due termini come sopra nelle eq. (1), ma l'interazione tra fascio neutronico e materia differisce significativamente dall'interazione del fascio fotonico. Queste differenze rendono le due radiazioni mutuamente complementari per la diagnostica dei materiali. La motivazione si evince considerando la probabilità di collisione di una particella (fotone o neutrone) su un bersaglio presente sulla sua traiettoria. Questa probabilità si esprime come rapporto tra flusso di particelle deviate e/o assorbite (N_S) rispetto al flusso di particelle incidenti (N_I) per in numero di atomi N_A presenti nell'area, o angolo solido A (= densità). Detta quantità è denominata sezione d'urto (σ) ed è espressa in cm^2:

$$\sigma = \frac{N_S}{N_I} \times \frac{A}{N_A} \qquad (2)$$

Dove N_S / N_A è il coefficiente di attenuazione (μ). Poichè i raggi x interagiscono con la nube elettronica che circonda i nuclei atomici, ed i neutroni invece interagiscono direttamente i nuclei atomici, la sezione d'urto dei neutroni è in genere minore di quella dei raggi x per gli elementi metallici a parità di flussi incidenti. Interessanti soluzioni grafiche identificano i rispettivi livelli di analisi [13]. Inoltre, proprio perché l'interazione neutronica interessa il nucleo, il risultato è sensibile alla composizione isotopica del nucleo stesso. Sensibilità preclusa ai raggi x. Ne segue che le informazioni ottenute dall'irraggiamento neutrone – fotone sono complementari non solo per la diversa efficacia alle diverse profondità di penetrazione ma anche per la diversa efficacia nella identificazione degli elementi leggeri, degli isotopi, della struttura dei solidi magnetici. Nel campo del magnetismo e dei fenomeni indotti dagli stress termici (e.g. saldature) di materiali in presenza di Nikel diventa interessante valutare gli effetti indotti sull'assetto reticolare rilevabile a raggi x dalla struttura magnetica (rilevabile a neutroni) ed identificare quindi l'assetto e la reologia agli shock termici dell'anisotropia magnetocristallina. Semplici esperimenti preliminari sono stati condotti su materiali naturali una decina di anni fa [14].

Se denotiamo con Φ_n il numero di neutroni o fotoni per cm^2 e per secondo, la perdita relativa d'intensità, dopo aver attraversato uno spessore t può essere scritta secondo la legge esponenziale:

$$\phi_n(t) = \phi_n(0)\, e^{-\mu \cdot t} \qquad (3)$$

Ne segue che lo spessore *t* nell'attraversamento dei diversi piani reticolari deve tenere conto dell'angolo d'incidenza (θ), del coefficiente di attenuazione (μ) oltre che del coefficiente di assorbimento di massa (ρ) che una costante del materiale indipendentemente dal suo stato fisico:

$$t \sim \operatorname{sen}\theta / \mu * \rho \qquad (4)$$

Indipendentemente dall'uso dei raggi x o dei neutroni per realizzare il fenomeno della diffrazione da materiali per la loro caratterizzazione e/o qualificazione alla scala nanometrica, è raccomandabile e talvolta indispensabile, l'uso dei processi di calibrazione.

Il processo di calibrazione consiste nel calcolo di effetti sistematici non removibili e che sono correlati sia alle prestazioni dello strumento, sia all'assetto sperimentale nel suo insieme. Ad esempio, adottando il metodo denominato Diffraction Instrumental Monitoring si ottiene una drastica riduzione dello sparpagliamento dei risultati, rispetto alla linea di zero [15], [16]. Ne segue che le fluttuazioni residue sono di natura puramente casuali con oscillazioni intorno al valore atteso. Il motivo del raggiungimento di tale regolarità è che il modello di calibrazione considera tutti i parametri che partecipano all'assetto sperimentale e non solo quelli puramente strumentali. Ne consegue un aumento di accuratezza e riproducibilità nella determinazione del parametro reticolare con conseguente traslazione nell'accuratezza aumentata per la determinazione delle tensioni residue che sono di particolare interesse industriale. L'aumentata accuratezza attua anche una migliore determinazione dei fattori di forma dei parametri di profilo. Da tale aumentata accuratezza, ripetibilità e riproducibilità, deriva in modo ovvio una miglior determinazione delle tensioni residue, delle micro e nano strutture, delle deformazioni reticolari, etc. Questi risultati hanno un impatto la determinazione e sulle misure di deformazione causate da carichi meccanici, cicli termici (creep) e fatica.

Dal punto di vista tecnologico è possibile identificare le curve caratteristiche delle prestazioni degli strumenti. I diagrammi in basso a sinistra e a destra di Fig. 1 mostrano le curve caratteristiche di due distinti diffrattometri a raggi x su cui sono stati condotti tre cicli di calibrazione nell'arco di diciotto mesi circa.

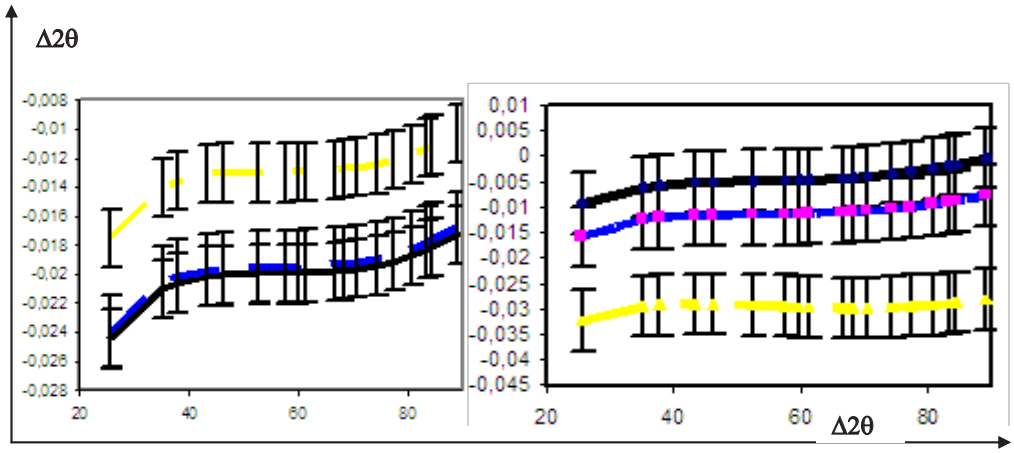


Figura 1: curve caratteristiche di diffrattometri ottenute utilizzando il Diffraction Instrumental Monitoring

Risulta evidente, entro gli errori sperimentali, la ripetibilità delle prestazioni, confrontando i tre cicli di ognuno dei due diffrattometri e la riproducibilità, confrontando le due figure tra i due diversi diffrattometri. Tutto questo si traduce in una migliore affidabilità dei risultati in relazione agli standard.

3. NUOVI SVILUPPI TECNOLOGICI

Sin dal convegno SAFAP 2006 sono stati indicati i nuovi sviluppi che sono maturati nel corso di un paio di decenni nell'Università di pisa e che più recentemente hanno condotto alla realizzazione di un diffrattometro capace di superare le limitazioni ed i vincoli strutturali presenti nei diffrattometri tradizionali. [17], [18], [19],[20].

La componentistica degli impianti moderni e degli elementi costituivi (tra questi è incluso il

materiale) assumono oggi una varietà geometrica, costitutiva così ampia da rendere complicato verificare sul campo le grandi (forse uniche) potenzialità delle metodiche diffrattometriche (XRD e ND). Per superare questa difficoltà il Università di Pisa e Consorzio Pisa Ricerche hanno collaborato con Alenia fin dall'inizio degli anni novanta (secolo scorso), prima per individuare i punti critici di detta analisi sul campo; poi Università di Pisa ed ISPESL hanno cooperato per realizzare un prototipo da laboratorio che è stato denominato DifRob. Detto prototipo ha avuto successo; grazie alla numerose prove fatte in collaborazione con XRD-Tools (spin off accademico dell'Università di Pisa) da cui sono stati identificati effetti di deformazione reticolare e micro strutturale indotte da presenza di saldature e/o alterazioni in superficie di varia natura [21], [17], [18]. Se ne deduce che la via intrapresa è corretta perché dimostra la capacità del metodo XRD di distinguere tra tensioni residue e microstruttura, ovvero gli elementi di base per la determinazione dei fenomeni a creep.

Tutto questo dimostra che la XRD è una solida metodica ed è adeguata agli obiettivi del creep e che richiede il raffinamento della tecnologia per la diagnostica on site. Detto raffinamento si deve concretizzare nei seguenti due punti:

- flessibilità ed adattabilità della tecnologia diagnostica alla multiforme caratteristica degli impianti
- miglioramento della risoluzione degli effetti presenti nel segnale.

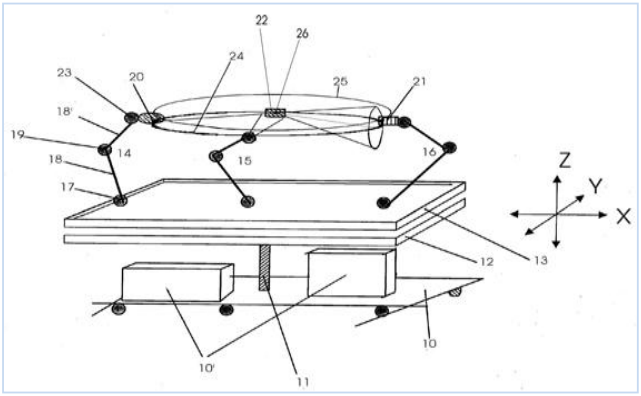


Figura 2: Schema di tecnologia nanonodiffrattometrica a goniometro virtuale per eseguire diagnosi di materiali, componenti e manufatti posizionati in ambienti di difficile accesso, indipendentemente dalla profondità di penetrazione necessaria per la diagnosi e per le misure reticolari. Il sistema permette metodiche CND complementari tra loro, incluso sistemi di puntamento e riconoscimento di forme

Rispetto ai diffrattometri tradizionali ha molti più gradi di libertà nelle movimentazioni, il centro del goniometro non solo è svincolato dal goniometro, ma la sua focale è variabile, rendendolo adattabile a molti componenti industriali e manufatti.

Il limite principale del precedente prototipo e che obbligava l'avvicinamento alla superficie da investigare fino 5 mm di distanza è stato superato con un significativo passo inventivo che avvicina il metodo XRD ai metodi più avanzati di *remote sensing*. Con questo sistema non solo è possibile controllare in remoto la raccolta dei dati e in piena sicurezza degli operatori, ma è anche possibile raccogliere dati da una distanza significativa dall'oggetto da investigare. La distanza dipende dall'assorbimento del mezzo di trasmissione della radiazione una volta che emerge dal sistema d'irraggiamento. [22] Nella stessa direzione di aumento della flessibilità strumentale in vista di analisi complesse che richiedono metodi complementari è lo schema di Figura 2 che rappresenta un sistema robotico che va sotto il nome di apparato per diagnosi robotica goniometro virtuale (DiaRob VG), [23]. L'apparato in forma generale è costituito da tre robot indipendenti, opportunamente pilotati su una traiettoria controllata che, in caso applicazione diffrattometrica resti valida la legge di Bragg sia nella sua formulazione tradizionale sia in quella generalizzata, contente l'espressione dell'incertezza. [18]. Detti robot possono essere equipaggiati con una qualsiasi sorgente: XRD, ND, XRF, di altra natura elettromagnetica,

acustica, etc. Nel caso dell'applicazione per la diffrazione a neutroni, il sistema deve essere opportunamente dotato di un moderatore per la termalizzazione dei neutroni che sono emessi da una sorgente a spallazione Deuterio-Deuterio. Queste sorgenti emettono un flusso abbastanza elevato di neutroni, sono di dimensioni e peso adeguato per essere trasportate su mezzi adeguatamente attrezzati di dimensioni non piccole ma adatte al trasporto normale su gomma, ferro e nave. Questo tipo di sorgenti offre vantaggi rispetto a quelle ad alto flusso per il fatto che sono trasportabili e funzionano con la corrente di rete. Offrono vantaggi rispetto alle sorgenti radioattive naturali perché il tempo di emissione può essere facilmente controllato mediante un interruttore di corrente.

L'aspetto di radioprotezione deve tenere conto delle capacità di confinamento del fascio prodotte dal sistema di cui al punto 3 e un addizionale sistema di confinamento a cuscinetti d'acqua. Il progetto, apparentemente ambizioso è tutt'altro che fuori dalla portata di fattibilità; risultati preliminari ottenuti prima attraverso una simulazione Montecarlo e poi in esperimento veramente propedeutico presso il reattore dell'Enea di Roma (Tapiro) indicano che le ipotesi e le limitazioni indicate in precedenza portano a numeri realistici di fattibilità sufficienti per la diffrazione da reticoli e conseguente rilevazione del fascio diffratto con tempi di misura ragionevoli.

4. IL PANORAMA DELLA NORMATIVA EUROPEA XRD E ND DALLA SITUAZIONE ATTUALE ALLE PROSPETTIVE DI SVILUPPO

I suggerimenti provenienti dalla comunità scientifica e tecnologica interessata alle applicazioni dei metodi diffrattometrici per la diagnosi dei reticoli dei materiali, contribuirono ad un progetto normativo articolato su tre livelli principali: i. omogeneizzare i concetti fondamentali e le criticità del metodo diffrattometrico nei diversi elementi costitutivi (i.e. principi, procedure, strumenti, termini, materiali di riferimento); ii. definire i metodi di prova per diversi tipi di analisi (e.g. tensioni residue a mezzo XRD e ND); iii. definire le specifiche tecniche per la qualificazione dei materiali per l'uso di destinazione.

Risulta evidente che le norme di cui al punto iii. rientrano in un contesto normativo intermedio tra le norme di metodo e di prodotto; è anche innegabile che, per le caratteristiche intrinseche dei metodi diffrattometrici, la loro pertinenza sia destinata agli usi di omologazione e di certificazione.

Un impegno che è costante dell'Università di Pisa sin dall'inizio dell'incarico di responsabilità del gruppo del CEN è lo stimolo verso attività di ricerca pre-co-normativa e nel quadro della legislazione e delle politiche europee. Il processo di prioritizzazione per essere efficace deve ottenere il pieno sostegno industriale, principalmente nella nazione promotrice. In questo all'Università di Pisa si deve riconosce una grande lungimiranza che si è scontrata troppo spesso con una grande distrazione o con interessi di corto raggio.

Oggi la normativa recepisce uno stato dell'arte nota ad oltre una decina di anni fa. La proposta di standard Europeo sulla XRD partì da UNI nell'Ottobre del 1994, mossa dall'emergere di alcuni punti critici e apparentemente non risolvibili se non la definizione e la condivisione di buone pratiche; detti punti critici scaturiscono dai numerosi round robin tests eseguiti tra gli anni settanta e novanta [24]. Questi test evidenziano una elevata consistenza interna degli spettri di diffrazione, unita ad una significativa disomogeneità, non solo nei confronti tra diffrattogrammi raccolti da altri con strumenti simili e/o diversi, ma anche nei confronti di dati raccolti con lo stresso strumento in tempi diversi. Dunque a quel tempo la motivazione inevitabilmente risulta attraente più per i produttori di diffrattometri che per gli utilizzatori. La conseguenza oggi è che la norma UNI EN13925-3, dedicata alla strumentazione, contiene una parte rilevante riservata alle relazione tra responsabilità del costruttore e responsabilità del conduttore e a quelle dell'utilizzatore. Non deve quindi sorprende che l'aspetto dedicato ai problemi metrici, i.e. calibrazione ed argomenti correlati, materiali di riferimento, al di là della loro difficoltà intrinseca, siano stati trattati con una spinta minore rispetto alle reali necessità. Da qui, nel confronto europeo, nasce la debolezza del sistema italiano, dove la dimensione del produttore medio di XRD non supera il livello di nano, microimpresa e davvero raramente piccola. Dunque il grande dinamismo dell'Univestità di Pisa nel quinquennio 1995-2000, potendo essere utile a dare il segnale di opportunità di aggregazioni, si scontra invece con quel sistema di classificazione

disciplinare, particolarmente rigido in Italia, in cui la XRD, o meglio la XRPD[1], risulta lontana dai concetti tipici delle prove non distruttivi. Solo alcuni anni dopo, ed in seguito ad un'intensa campagna d'informazione è stato possibile capire che la XRD, ovviamente equivalente ad XRPD, come chiarito nella nota, poteva influenzare positivamente le metodiche non distruttive, presenti nelle direttive nazionali ed europee.

Nello stesso periodo, nel panorama europeo, si assiste ad un significativo interesse tedesco, indirizzato alla definizione di un chiaro stato dell'arte tecnologico; l'interessamento francese, UK ed olandese, dove la presenza di realtà industriali di rilievo per dimensioni, quantità e qualità di utenza XRD e ND, sia pure non sempre compatibile con i concetti di non distruttività, tende a percorsi normativi per così dire divergenti. Da una parte si evidenzia l'interesse ad un uso qualitativo (e.g. identificazione della composizione) in applicazioni farmaceutiche e chimiche; dall'altra, l'attenzione è già più focalizzate all'analisi delle deformazioni per la determinazione di tensioni residue, più vicine alle applicazioni metallurgiche e con una certa sensibilità verso concetti d'incertezza e riproducibilità. E' proprio sulla spinta del settore industriale metallurgico che scaturiscono due norme, entrambe dedicate alla determinazione delle tensioni residue, la prima attraverso l'uso della XRD (EN15305) [3], la seconda attraverso l'uso della ND (UNI CEN/ISO/TS 21432), [7].

Sigla CEN	Sigla UNI	Contenuto	Stato CEN	Anno di approvazione CEN	Anno di recepimento Italiano
EN 13925-1	UNI EN 13925-1	General Principles	Disponibile	2003	2006
EN 13925-2	UNI EN 13925-2	Procedures	Disponibile	2003	2006
EN 13925-3	UNI EN 13925-3	Instruments	Disponibile	2005	2005
EN1330-11	UNI EN 1330-11	Terminology	Disponibile	2007	2007
ISO/TS 21432	UNI CEN ISO/TS 21432	Residual Stress Neutron Diffraction	Disponibile	2003	2006
EN 15305	-	Residual Stress XRD	Disponibile	2008	-
WI 138070	-	Reference Materials	In studio	-	-

Tabella 1: stato di sviluppo della norma europea sulle tematiche della diffrazione a raggi x e a neutroni.

Nel quadro delle attività del WG10 del CEN/TC138, occorre tenere conto di queste divergenze e governarle in termini di omogeneità ed armonizzazione tecnologica e terminologica prima ancora che di regolamentazione tecnico-legislativa. Recepite le diverse linee d'indirizzo viene sviluppato un progetto articolato su tre livelli, [25]. Dei tre livelli detti, per concludere il primo livello, è necessario definire la norma sui materiali di riferimento che è in fase avanzata di studio da parte degli esperti che si sono resi disponibili volontariamente; è necessario estendere le norme di secondo livello ai metodi di test specializzati per i diversi tipi di analisi possibili (e.g. identificazione dei componenti e delle concentrazioni, determinazione micro-nano strutturale, etc.). Le norme destinate alle specifiche tecniche per l'uso del metodo in applicazioni di particolare interesse industriale e civile, fanno parte del terzo livello.

Nel corso della decennale attività del Gruppo Europeo (CEN/TC138/WG10) sono stati redatti sei nuovi argomenti [25], tutti i documenti approvati sono stati recepiti da UNI ed un numero significativo di proposte per la realizzazione di futuri standard tecnici sono state indicati, [26].

Oltre al già citato documento in studio, che assumerà presumibilmente l'etichetta di prEN13925-4 in quanto conclusiva del set di norme di livello i., il training syllabus, la calibrazione degli strumenti e delle misure, la raccolta di nuovi termini non inclusi nella UNI EN1330-11 sono tra

i temi in lista di attesa, [6]. Altre urgenze sono state dichiarate sui seguenti "*Phase Identification and Quantification of Phase by X-ray diffraction*" e "*Use of the XRD as the test method for the determination of internal stress in thin crystalline ceramic layers*". Queste proposte sono scaturite da una ricerca stimolata, attraverso la Segreteria del TC138, direttamente dalla Direzione Ricerca e Sviluppo della Commissione Europea.

Non si può escludere dunque in un prossimo futuro una collaborazione qualificata e trasversale tra esperti di differenti comitati tecnici (e.g. materiali ceramici, materiali lapidei, beni culturali, etc.) che alimenti l'interesse verso norme di tipo "metodo di test per tipo di analisi" e del tipo "specifica tecnica di produzione attraverso XRD" per il raggiungimento di un obiettivo di prodotto. Sulla base di questo ragionamento, si possono prevedere una decina di norme di livello ii. Ed un numero elevato di nome di livello iii. Gli aspetti innovativi della tecnologia che saranno meglio delineati nel seguito potrebbero avere una capacità di penetrazione oggi difficile da prevedere e tale da riorganizzare il quadro presentato in Tabella 2. Da questo punto di vista la creazione di un Istituto Europeo della Diffrazione, discusso il 23-24 Gennaio 2008 con i responsabili olandese (Dr. Rob Delhez) ed inglese (Dr. Stephan Norval) è più di una proposta da inserire nel programma di prioritizzazione CEN Star come osservatorio di raccolta delle necessità conclamate dall'industria e dalla Società Civile e trasformarle in norme armonizzate. Questa stessa proposta va nel verso di collaborazione con altre iniziative europee quali ad esempio COST e la nuova associazione EPERC che tende ad identificare le priorità industriali e le nuove tecnologie di diagnostica non distruttiva applicabili.

	Settori tradizionali CND*	Settori non tradizionali CND	Strumenti
Armonizzazione concetti di base (EN livello i.)	Rinnovo o modifica di EN pubblicate		
Metodi di test (EN livello ii.)	Tre- cinque nuovi w.i.	Cinque nuovi w.i.	Due–tre nuovi w.i.
Specifiche tecniche per scopi specifici (TS,TR livello iii.)	Alcuni nuovi w.i.	Alcuni nuovi w.i.	Alcuni nuovi w.i.

*e.g. metallurgia, **e.g. chimico, farmaceutico, alimentare, lapideo, etc.

Tabella 2: Prevedibili sviluppi normativi

5. CONCLUSIONI

I recenti sviluppi tecnologici e metodologici suggeriscono un progressivo sviluppo ed uso delle diffrattometrie (XRD e ND) per la diagnosi precoce *on site* di materiali e la qualificazione dei componenti industriali per l'uso di destinazione con controlli non distruttivi. L'interesse attuale è indirizzato verso gli sviluppi della tecnologia; tra i più recenti segnaliamo soluzioni che tendono ad utilizzare sorgenti a bassa potenza e detector bidimensionali [27], [28].

Di seguito riportiamo una tabella comparativa al solo scopo di identificare le principali differenze e diverse potenzialità delle apparecchiature oggi disponibili. Oltre agli sviluppi della tecnologia la vera sfida si gioca su un insieme di aspetti di cui la tecnologia copre il più appariscente. In sintesi, detti sviluppi innovativi sono riassunti di seguito:

- aspetti strutturale della tecnologia
- aspetti cognitivi delle funzionalità per una controllabilità in remoto e da distanza
- aspetti cognitivi di metrologia per la valutazione dell'affidabilità dei risultati possibilmente da realizzare in tempo reale [16].

Anche l'aspetto normativo nell'ultima decade ha raggiunto alcuni traguardi [26] per quanto riguarda gli aspetti generali del metodo e le sue applicazioni alla determinazione delle tensioni residue, mediante raggi x e neutroni. Altri argomenti sono in fase di studio ad un diverso livello di sviluppo e di priorità; tra quelli prioritari vi è la definizione dei temi e degli approfondimenti necessari alla formazione del personale. Nonostante il molto lavoro svolto, occorre riconoscere che la maggior parte del lavoro è ancora davanti, specialmente pensando a quanto detto in questo lavoro.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] G. Berti, F. De Marco: "Diagnostica precoce sul posto con diffrattometria a raggi x", U&C, vol. LX, n. 1, 2010, pp. 16-18.

[2] EN13925-3, Non destructive testing - X ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials - Part 3: Instruments © CEN – AFNOR Paris

[3] EN15305, Non-destructive Testing - Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction

[4] EN13925-1, Non-destructive testing - X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous material - Part 1: General principles © CEN – AFNOR Paris

[5] EN 13925-2, Non-destructive testing - X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials - Part 2: Procedures © CEN – AFNOR Paris.

[6] EN1330-11, Non-destructive testing - Terminology - Part 11: X-Ray Diffraction from Polycrystalline and Amorphous Materials © CEN – AFNOR Paris

[7] CEN ISO/TS 21432 Residual Stress by Neutron Diffraction © CEN – AFNOR Paris

[8] J. Hasek, "X-ray and Neutron Structure Analysis in Materials Science", Plenum Press New York, 1989,

[9] R.J. Newport, B.D. Rainford, R. Cywinski: "Neutron Scattering at a Pulsed Source", IOP Publishing Ltd., 1988

[10] R. B. Von Dreele: "Neutron Powder Diffraction", in Modern Powder Diffraction, D.L. Bish & J.E. Post Ed. Reviews in Mineralogy, Vol. 20, 1989, pp. 333-369.

[11] R. Jenkins: "Instrumentation" and "Experimental procedures", in Modern Powder Diffraction, D.L. Bish & J.E. Post Ed. Reviews in Mineralogy, Vol. 20, 1989, pp. 19-100.

[12] G. Berti, L. Leoni and R. Carrara: "A peaks analysis method in X-Ray diffractometry", Rendiconti SIMP, 39, pag. 115-122, 1982

[13] A. Lodini et M. Perrin: "Analyse des contraintes residuelles par diffraction des rayons x et des neutrons, Impact graphics" 1996,

[14] G. Berti, "Microstructure of polycrystalline natural samples from the peak profile analysis of diffraction data", in Materials Science Forum, vol.347-349; p. 309-314

[15] G. Berti: "Method for routine comparison of XRPD measurements", Powder Diffraction, Vol. 16, n. 1, 2001, pag.1-6.

[16] G. Berti: "Application od Diffraction Instrumental Monitoring to the analysis of diffraction patterns from a Round Robin project on KCl", Powder Diffraction 16, pag. 6-15, 2001.

[17] G. Berti, A. Nicoletta, G. Augugliaro, F. De Marco, M. Pellizzon , P. Sofia "Analisi non distruttive in campo mediante diffrattometria a raggi X (XRD)" negli Atti della Conferenza Sicurezza ed Affidabilità delle attrezzature a pressione SAFAP 2006, 165-173, Roma 2006

[18] G. Berti. A. Nicoletta, F. De Marco, A. Tonti, G. Augugliaro, D. Pinciroli:"Il metodo XRD per l'osservazione di fenomeni alla scala nanometrica: comportamento a creep e sua propagazione" negli Atti della Conferenza Nazionale Sicurezza ed Affidabilità delle attrezzature a pressione SAFAP 2008, pag. 629-639, 2008

[19] G. Berti. A. Nicoletta, F. De Marco:"Analisi non distruttiva di una piastrina di allumina", negli Atti della Conferenza Nazionale Sicurezza ed Affidabilità delle attrezzature a pressione SAFAP 2008, pag. 549-556.

[20] G. Berti, F. De Marco: "Efficacia ispettiva e solidità della metodica "XRD in loco" per il rilevamento di potenziali fenomeni a creep" negli Atti della Conferenza Sicurezza ed Affidabilità delle attrezzature a pressione SAFAP2010, (in questa raccolta), Venezia 2010

[21] G. Berti: "At Distance controlled Diffractometer for XRD measurement in field", in Optics and Photonics, Coulter Ed., vol. 5906, pag. 311-325, San Diego 2005

[22] G.Berti " Diffrattometro a centro variabile", Brevetto N. 0001362652

[23] G. Berti “Apparecchiatura mobile per irraggiamento e rilevazione di radiazioni”, Brevetto N. 0001362296.

[24] G. Berti, M. D’Acunto and F. De Marco, “A quarter of century of Round Robin Test on XRD”, in Advances in X-Ray Analysis, pag.158-164, Denver 2001

[25] G. Berti, F. De Marco, G. Augugliaro, A. Nicoletta, “Stato di recepimento nazionale e di sviluppo al CEN della normativa europea XRD”, negli Atti della Conferenza Sicurezza ed Affidabilità delle attrezzature a pressione SAFAP2008, vol 1, pag. 151-158, Cagliari 2008.

[26] G. Berti, R. Delhez, S. Norval, B. Peplinski, E. Tolle, J. Verrolet, “Standardisation of X-Ray Powder Diffraction Method”. Mat. Sc. Forum Vols. 443-444 (2004), pp.31-34

[27] I. Marcelles et al., “Remaining Life evaluation of High Temperature components by X-ray Diffraction”, in Proceedings of ECCC Creep Conference, pag. 946-958, London, 2005

[28] G. Chiari and P. Sarrazin, “X-Duetto: a new portable XRD/XRF device” in Proceedings of SMW 2008, pag. 451-456, Florence 2008.

NOTE

(1) XRPD = X-Ray Powder Diffraction. In quanto funzionale ai concetti che saranno esposti in seguito, qui interessa ricordare che il concetto di polvere per un esperimento di diffrazione è lo stato di coesione efficace del provino, i.e. il numero e le dimensioni dei cristalliti che costituiscono il provino. Non è il grado di coesione apparente (= macroscopico) che permette di distinguere tra polvere o blocco. Queste dimensioni dipendono dal volume del provino dal quale i raggi X diffratti sono rilevati e quindi dall’assorbimento dei raggi X, dalla forma. Per questo riteniamo che la distinzione tra le due sigle XRPD e XRD sia superflua e possa essere relegata ad un ricordo storico della seconda metà del secolo scorso quando tra i diffrattometristi prevaleva l’uso del metodo a cristallo singolo.

15
L'approccio normativo per la gestione delle riparazioni temporanee di attrezzature in pressione

R. Balestrieri - E. Carducci* - G. Giannelli* - G. Gorrino**
I. Mazzarelli - G. Mella* - P. Morucchio* - A. Pallano**
F. Palombo - E. Pichini* - G. Sferruzza**
** Membri del C.T.A.I.P. dell'ISPESL*

Con l'entrata in vigore del D. Lgs. 93/2000 e l'applicazione del D. Lgs. 329/04, oltre alle attrezzature che già erano regolamentate dai precedenti Decreti, anche i recipienti per liquidi e le tubazioni entrano a far parte delle attrezzature che devono, obbligatoriamente, essere sottoposte a denuncia, verifiche periodiche di funzionamento e d'integrità.

L'abituale ricorso, da parte degli utilizzatori, ad interventi di riparazione temporanei, prima dell'entrata in vigore del 329/04, ha imposto anche al CTAIP dell'ISPESL di regolamentare urgentemente gli stessi, a fronte di un vuoto normativo nel panorama italiano. Si è considerato lo stato dell'arte in tale materia, e si sono coinvolte le aziende che utilizzano tali tecnologie, per verificare sul campo la gestione delle riparazioni temporanee con i soggetti interessati.

Il CTAIP ha ritenuto di procedurare le riparazioni temporanee nel suo documento protocollo A00-07/0000821/10 "**Procedura ISPESL per la riparazione temporanea di attrezzature a pressione già in esercizio alla data del 12/2/2005 e comunque commercializzate fino al 29/5/02 e/o certificate in conformità alla Direttiva 97/23 CE PED**.

Campo di applicazione

La riparazione temporanea si applica agli impianti a ciclo continuo e/o a quelli che rivestono caratteristiche di pubblica utilità o servizio essenziale.

Riparazioni temporanee

Per gli impianti, rientranti nel campo di applicazione, in presenza di difetti che possono pregiudicare l'esercizio di un'attrezzatura, a giudizio e sotto la responsabilità dell'utilizzatore possono essere effettuati interventi di riparazione temporanea (anche con attrezzatura in esercizio), finalizzati a mantenere la stabilità strutturale dell'attrezzatura e garantire il contenimento delle eventuali perdite .

La circolare evidenzia per riparazioni temporanee:

a) Riparazione temporanea di tubazioni

b) Riparazione temporanea di recipienti e generatori di vapore o acqua surriscaldata

c) Procedure di riparazione temporanea di attrezzature a pressione mediante metodi e tecniche emesse da licenziatario o dal detentore della licenza/brevetto, da qualificarsi a cura dell'ISPESL

Riguardano le riparazioni temporanee in tubazioni rientranti tra quelle soggette a procedura di riparazione ai sensi dell'art. 14 del DM 329/04, in conformità alle norme elencate nell'appendice 1 della circolare o a riparazioni mediante metodi e tecniche sotto brevetti nazionali o internazionali che saranno presentati all'ISPESL per la qualificazione della procedura.

Si è posto l'accento sulla responsabilizzazione dell'utilizzatore/manutentore nella scelta di operare riparazioni temporanee e l'analisi del rischio che comporta la sua valutazione relativa a:

- gli aspetti generali dell'intervento;
- la natura e causa delle perdite;
- l'entità dei danni eventuali;
- le condizioni operative;
- la conoscenza dello stato dell'impianto(riparazioni ed interventi di manutenzione, piano dei controlli effettuati ecc.);
- le condizioni dello stato delle membrature/tubazioni/bulloni/guarnizioni/supporti ecc.;
- la natura e stato del fluido;
- la predisposizione dell'acceso all'impianto ed eventuale evacuazione in caso di emergenze;
- ogni altra eventuale considerazione legata alla conoscenza della norma tecnica o procedura di riparazione;
- L'autorizzazioni all'esecuzione dei lavori;
- Rapporto finale con indicati i termini temporali della riparazione temporanea con il piano dei controlli successivi.

L'individuazione di norme tecniche riconosciute per questa tipologia di interventi e la possibilità di utilizzo di altre tecniche di contenimento delle perdite, permetterà di far lavorare le aziende e i tecnici della prevenzione su basi di lavoro procedurate.

Per la prima volta in ambito europeo si è cercato di normare delle tecniche di riparazione non definitiva, permettendo di mettere in sicurezza, con metodologie, materiali, procedure non conformi ai progetti originali delle attrezzature, per il tempo necessario a poter operare, in sicurezza, per la riparazione definitiva.

Indice

Presentazione ..... pag. 5

Calendario degli interventi ..... pag. 7

Atti del Convegno

sessione PLENARIA

S. Valery - S. Di Pietro
La sicurezza in Enel: il miglioramento continuo con le imprese appaltatrici ..... pag. 17

M. Cannerozzi de Grazia - G. Riva - G. Pinna
Contributo del CTI all'aggiornamento delle norme italiane ed europee nell'ambito degli impianti a pressione e relativa organizzazione ..... pag. 25

sessione TEMATICA
NORMAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE

M. Cannerozzi de Grazia
Procedura approfondita di valutazione globale di conformità degli insiemi: Orientamento e proposta di attuazione del Forum europeo degli O.N. (CABF/PED)..... pag. 31

V. Annoscia - N. Pecere - A.M. Altieri
La valutazione del rischio sismico nella progettazione delle attrezzature a pressione .. pag. 37

E. Leoni - F. Rossi
Aspetti critici per la verifica sismica secondo le NTC dei serbatoi criogenici in pressione..... pag. 47

F. Lorino - G. Perozzi
La progettazione secondo il codice EN 13445 ed ASME VIII div 1 degli apparecchi in pressione in regime di scorrimento viscoso. Confronto tra differenti metodologie di calcolo..... pag. 57

S. Pagano - G.L. Cosso
Procedure di calcolo numerico per l'analisi strutturale di componenti in creep basate sulla definizione della "reference stress"..... pag. 67

A. Iacino - F. Giacobbe
Interventi di riparazione su colonne. Confronto esito calcolo strutturale analitico e agli elementi finiti..... pag. 75

A. Dragonetti - L. Gaetani - F. Vivio
Analisi a creep di saldature con metodi DBA soggette a carichi combinati esterni di pressione e temperatura..... pag. 85

G. de Gennaro - M. Godono - M. Nardelli - G. Di Palmo
Valutazione e gestione del rischio delle camere iperbariche nelle strutture sanitarie..... pag. 95

G. Sferruzza - M. Godono
La messa in servizio di una Camera Iperbarica nella Repubblica di San Marino ..... *pag. 105*

M.A. Pierdominici - E. Artenio
Decreto legislativo 27 Gennaio 2010
Recepimento della direttiva quadro 2008/68/CE ..... *pag. 110*

M. G. Gnoni - G. Lettera - P. Tundo - A. Tonti - A. Fiodo
Proposta di una piattaforma RFID-based per la gestione
delle verifiche di apparecchi a pressione ..... *pag. 113*

sessione TEMATICA
PROVE NON DISTRUTTIVE

G. Nardoni - M. Certo - M. Feroldi - P. Nardoni - D. Nardoni
Utilizzo dell'eco difratto nelle tecniche ad ultrasuoni TOFD, PHASED ARRAY,
PULSE-ECO per rilevare l'altezza dei difetti nelle saldature. ..... *pag. 121*

G. Augugliaro - C. De Petris - C. Mennuti - P. Quaresima - P. Lenzuni
Analisi EA di grandi serbatoi interrati per GPL ..... *pag. 129*

F. Rossetti - R. Invernici - F. Zullo
La valutazione sullo stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in
esercizio ai fini della riqualificazione periodica d'integrità,
in accordo all'art. 16 del D.M. 329/04: benefici derivanti dall'ispezione con
campo remoto (RFT) e correnti indotte (ET) ..... *pag. 137*

G. Berti - F. De Marco - D. Pinciroli
Efficacia ispettiva e solidità della metodica "XRD in loco"
per il rilevamento di potenziali fenomeni a creep ..... *pag. 146*

D. Corò
L'utilizzo della radiografia digitale (DR) nell'ispezione
delle attrezzature a pressione ..... *pag. 154*

G. Gusmano - D. Lazzaro - C. Mennuti - G. Montesperelli - P. Travaglia
Rilevamento di fenomeni corrosivi su acciaio P01
con il metodo di Emissione Acustica ..... *pag. 161*

E. Pichini - U. Giosafatto - A. Liedl
Tecniche termografiche per la progettazione e
la manutenzione delle attrezzature a pressione ..... *pag. 171*

G. Franceschini - G. A. Zuccarello
I serbatoi di stoccaggio ammoniaca a pressione atmosferica:
Fitness For Service, analisi Leak Before Break, selezione di strategie
ispettive non intrusive consolidate (UT TOFD e Phased Array) e
possibili sviluppi con Emissioni Acustiche (AE) ..... *pag. 182*

F. Bertoncini - M. Raugi - F. Turcu
Studio dell'applicabilità della tecnica ad onde guidate
nell'ambito dei fluidi criogenici ..... *pag. 194*

sessione TEMATICA
INTEGRITÀ STRUTTURALE DI MATERIALI E COMPONENTI

G. Calvano - A. De Musso
Analisi e vita residua per piping soggetto a D.M. 329/04 ..... *pag. 203*

G. Mari - R. Lauri - C. Metaponte - V. Romani
Iter di individuazione delle criticità e studio di un processo
svolto in un reattore chimico finalizzati al raggiungimento
di elevati standard di sicurezza ..... *pag. 206*

S. Galasso - P. Mineo
Alfa Consulting e la "Specifica tecnica applicativa del DM 329/04 (per la messa in servizio e l'utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione): dalla ricerca e sviluppo all'esperienza operativa ..... *pag. 216*

G. Pitti - N. Palumbo
La redazione della Relazione Tecnica di cui all'art. 6 del D.M. 329/04: case history nello stabilimento Polimeri Europa S.p.A. di Mantova ..... *pag. 224*

G. Sferruzza - G. Canale - G. Cevasco - F. Sabatini
Verifiche a campione sull'idoneità dei dispositivi di sicurezza posti a protezione della tubazioni esistenti denunciate in accordo all'art. 16 del D.M.329/04 ..... *pag. 233*

A. Alvino - D. Lega - F. Giacobbe - V. Mazzocchi - A. Rinaldi
Fenomeni di degrado per esercizio ad alte temperature su acciai ad alto tenore di Ni Cr ..... *pag. 241*

M. De Marco - E. Ferrari - R. Grandicelli - C. Servetto
Failure analysis di un tubo piolinato prelevato da una caldaia a biomasse vegetali ..... *pag. 251*

R. Balistreri - E. Pichini - R. Cozza - M. Serra
Riparazione temporanea di attrezzature in pressione mediante applicazione di fibre di carbonio e resina ..... *pag. 257*

F. Giacobbe - A. Polimeni - M.A. Russo - L. Romani - A. Scaglione - S. Guarnaccia - A. Gitto
Riparazione di tubazioni ai sensi dell'art. 14 del D.M. 329/04 ..... *pag. 267*

G. Augugliaro - F. Brini - C. De Petris - G. Inguì - C. Mennuti
Approccio valutativo strutturato per la verifica d'integrità di attrezzature a pressione ai fini della riqualificazione periodica ..... *pag. 274*

S. Benedetto - P. Chiantella - G. Chiofalo - A. Scaglione
Verifica di integrità di serbatoi tumulati per stoccaggio di GPL ..... *pag. 287*

M. Larice - G. Frare - L. Tardivo
Affidabilità e sicurezza di esercizio di generatori di vapore esercitati oltre i 45 anni in centrali termoelettriche di potenza – esperienze operative ..... *pag. 296*

G. Picciolo - A. Tonti - A. Barison
Valutazione della vita residua di materiali in regime di scorrimento viscoso a caldo di una attrezzatura a pressione con strumentazione di misura e controllo di processo conforme alla Norma CEI EN 61508 (SIL): risultati dell'applicazione reale in un impianto di raffineria ..... *pag. 305*

sessione TEMATICA
ANALISI DEI RISCHI

F. Giacobbe - A. Polimeni - P. Sergi - M.A. Russo - F. Olivo - S. Morelli
Prove di scoppio su bombole GPL ..... *pag. 317*

G. Mulè - G. Mulè
Pressure Equipment Risk Analysis Learning from Accident ..... *pag. 325*

G. Argento - V. Nastasi
DM 293/01 e DLgs 238/95: Controllo di incidenti rilevanti nei porti industriali, petroliferi commerciali.
Un esempio applicativo: Il porto petrolifero di Gela ..... *pag. 334*

A. Nuzzo - E. De Benedictis - F. Ingravallo
Esempio di applicazione del metodo RBI "Risk based Inspection" nell'ottica di un nuovo approccio agli adempimenti imposti dal DM 1 dicembre 2004, n.329 ..... *pag. 344*

P.A. Bragatto - P. Pittiglio - S. Ansaldi - P. Agnello
Gestione integrata dei controlli delle attrezzature a pressione negli stabilimenti Seveso ..... *pag. 362*

F. Ricci - V. Corregia - C. Delle Site - A. Faragnoli - G. Canale
Periodicità delle verifiche e dei controlli attrezzature a pressione: riferimenti legislativi metodologie analitiche ..... *pag. 371*

D. Nevoso - A. Scaglione - P. Chiantella
Criterio per la valutazione di criticità delle macchine nel settore Oil&Gas ..... *pag. 381*

G. Boccardi – R. Bubbico - G.P. Celata - R. Trinchieri - F. Di Tosto
Studio Teorico-Sperimentale sulle Perdite di Carico Concentrate e Ripartite in Efflusso Bifase ..... *pag. 389*

V. De Lisio - C. Di Girolamo - C. Robino
Dispositivi a disco di rottura: requisiti principali per la corretta installazione e manutenzione ..... *pag. 399*

G. Boccardi - G. P. Celata - F. Di Tosto - Trinchieri
Programma per il Dimensionamento delle Valvole di Sicurezza in Bifase secondo ISO/DIS4126-10 e Confronto con Dati Sperimentali ..... *pag. 409*

L. Greco - A. Padoan
Dimensionamento dei dispositivi di scarico di emergenza. con efflusso bifase ..... *pag. 420*

N. Altamura - V. Annoscia - D. Sallustio
Deterioramento dei serbatoi criogenici ..... *pag. 431*

sessione POSTER

1
F. Giacobbe - A. Scaglione - S. Guarnaccia - D. Geraci - L. Monica - M. Madonna
L'approccio risk management nei processi di manutenzione per il monitoraggio delle attrezzature a pressione ..... *pag. 437*

2
V. Nastasi - G. Argento
Impianti frigoriferi, di condizionamento e di climatizzazione costruiti ed esercitati in conformità al D.lgs. 93/2000 (PED), al DM 329/04 e al D.lgs. 81/2008 mod. D.lgs. 106/09 ..... *pag. 443*

3
A. De Musso - M.F.S. De Musso
Attrezzature o insiemi a pressione (autoclavi) funzionanti a temperatura maggiore di 100°C. La sicurezza nei cicli di funzionamento in continuo applicati agli apparecchi di tintura dei filati in corda e della cottura di alimenti in scatola ..... *pag. 451*

4
G. Inguì
Le fasi essenziali di vita di una attrezzatura/insieme a pressione ..... *pag. 460*

5
A. Tonti - P. Bragatto
La rappresentazione digitale parametrica di attrezzature a pressione. ..... *pag. 465*

6
A. Alvino - D. Lega - F. Giacobbe - A. Rinaldi - D. Ramires
Caratterizzazione microstrutturale di acciai esercitati in impianti di steam reforming ..... *pag. 474*

7
F. Giacobbe - V. Mancuso - M. Lanzani - C. Sampietri - A. Branca
Confronto esito valutazioni sullo scorrimento viscoso di tubazioni in A335 P22 con oltre 200.000 ore di esercizio ..... *pag. 486*

8
C. Delle Site - A. Silvetti - R. Iovene
ENOS: un programma di calcolo integrato per la valutazione della vita consumata a scorrimento viscoso ..... *pag. 494*

9
G. Franceschini - G. Zuccarello - F. Zichichi
La valutazione dello stato di conservazione ed efficienza della tubazione in un impianto produzione Ammoniaca ed Urea: un approccio sistematico per l'ispezione e la manutenzione delle attrezzature a pressione in conformità al D.M. 329/04 ed introduzione alla Risk Based Inspection ..... *pag. 500*

10
A. Alvino - F. Ciuffa - D. Lega - D. Ramires
Metodologie di indagine microstrutturale per la valutazione del danno da scorrimento viscoso su acciai per impiego ad alta temperatura ..... *pag. 514*

11
N. Palumbo - G. Gurnari
Illustrazione della Procedura di Hauptmanns ..... *pag. 520*

12
D. Sallustio - N. Altamura - M. Godono
La sicurezza elettrica nelle camere iperbariche ..... *pag. 530*

13
A. Rinaldi - A. Alvino - D. Lega - V. Mazzocchi - E. Pichini - F. Giacobbe
La modellazione microstrutturale e lo studio del danno in acciai ad alta temperatura ..... *pag. 537*

14
G. Berti - F. de Marco - E. Tolle
Tecnologie diffrattometriche alla nanoscala: nuove frontiere di sviluppo e normazione ..... *pag. 546*

15
R. Balestrieri - E. Carducci - G. Giannelli - G. Gorrino - I. Mazzarelli
G. Mella - P. Morucchio - A. Pallano - F. Palombo - E. Pichini - G. Sferruzza
L'Approccio normativo per la gestione delle riparazioni temporane di attrezzature a pressione ..... *pag. 557*

sponsor tecnici









con il patrocinio di



