IGF8 - VIII Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Genova, 27 - 29 maggio 1992

APPLICAZIONI DELLA PROCEDURA R6 PER L'ASSICURAZIONE DELLA QUALITA' NELLA PROGETTAZIONE E NELLE ISPEZIONI IN SERVIZIO DI COMPONENTI STRUTTURALI

S. Reale, L. Tognarelli

Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali - Università di Firenze
Via di S. Marta, 3 - 50139 FIRENZE

SOMMARIO

La Procedura CEGB R6, sviluppata come metodologia per l'esecuzione delle verifiche di sicurezza di strutture difettate in termini di Meccanica della Frattura, è uno strumento potente e versatile che può essere utilmente impiegato in problemi di Assicurazione della Qualità nella progettazione e nell'ispezione in servizio di componenti strutturali.

Viene presentata la possibilità di applicare la Procedura R6 per il miglioramento della qualità delle metodologie di progettazione: viene descritta la possibilità di utilizzo della R6 per la progettazione affidabilistica, in termini di Meccanica della Frattura, di componenti strutturali.

Nell'ambito dell'Assicurazione della Qualità nelle Ispezioni in Servizio, la Procedura R6 può essere di valido aiuto nella qualificazione e nel confronto di normative di controllo non distruttivo e nella valutazione delle performance di tecniche, di procedure, di team di NDT.

1. Introduzione

Nell'ambito degli aspetti connessi all'Assicurazione della Qualità di componenti strutturali, soprattutto in impianti ad alto rischio, ad alto contenuto tecnologico, di elevato costo, la presenza di difettosità interne è caratterizzante ai fini delle problematiche relative alla sicurezza, all'affidabilità, all'integrità strutturale.

La valutazione della sicurezza, dell'affidabilità, dell'integrità strutturale comporta la conoscenza delle effettive condizioni operative e di funzionamento, delle caratteristiche meccaniche del materiale, oltre che della qualità interna del materiale (tipo, posizione e dimensione dei difetti).

Nell'ambito progettuale l'incertezza associata alla conoscenza dei precedenti

parametri viene risolta prevedendo l'impiego di opportuni coefficienti di sicurezza indicati dalle normative.

Il valore esplicito del coefficiente di sicurezza tiene conto della variabilità delle caratteristiche del materiale e dello stato di sollecitazione; viene definito in funzione della probabilità di occorrenza delle condizioni di carico. Esiste un ulteriore coefficiente di sicurezza implicito contenuto nella definizione del difetto di riferimento utilizzato per i calcoli di progetto; le dimensioni e la posizione del difetto di riferimento sono legate alla probabilità di occorrenza del difetto stesso [1] .

Nell'ambito del controllo di qualità e dell'ispezione in servizio esiste, ai fini della valutazione dell'integrità strutturale, la necessità di ottenere informazioni sulla precisione con la quale le tecniche di controllo non distruttivo (NDT) determinano dimensioni e posizione dei difetti e sulla loro probabilità di rilevamento (Effectiveness delle tecniche NDT) [2].

In generale la presenza di difettosità comporta una riduzione dell'integrità e quindi dell'affidabilità strutturale. La Qualità di elementi strutturali può essere quantizzata attraverso la valutazione dell'integrità strutturale e dei margini di sicurezza oppure attraverso la stima della probabilità di rottura e l'introduzione di parametri affidabilistici. La Meccanica della Frattura fornisce gli strumenti per poter valutare il margine di sicurezza di una struttura difettata.

La Procedura CEGB R6 [3, 4, 5] è una procedura sviluppata per eseguire la verifica di integrità di strutture difettate sottoposte a condizioni di esercizio ben definite. Tuttavia la sua versatilità e le sue caratteristiche consentono analisi e confronti tra situazioni fortemente diversificate, per tipo di materiale, per tipo di sollecitazione, per tipo di geometria della struttura e per tipologia e geometria dei difetti e la rendono uno strumento potente e di vasta applicabilità.

Applicando la Procedura R6, le condizioni operative di una struttura difettata sono rappresentate in termini dei due parametri adimensionali L_r e K_r che definiscono la situazione effettiva della struttura in esame nei confronti rispettivamente delle condizioni di collasso plastico e di frattura fragile. I due termini L_r e K_r possono essere riportati sul piano del Failure Assessment Diagram (FAD) come coordinate di un punto; se il punto rappresentativo delle condizioni operative della struttura in esame così definito è situato all'interno dell'area delimitata dagli assi e dalla Assessment Line, la struttura può essere considerata in sicurezza, mentre se il punto cade sulla linea o nell'area esterna a quella sopra definita si deve ammettere la possibilità del cedimento della struttura.

La Failure Assessment Line non contiene fattori di sicurezza intrinseci; la Procedura R6 consente di valutare per una data situazione i margini di sicurezza tramite i Reserve Factor (RF). Il Reserve Factor è espresso dal rapporto tra il carico che produce le condizioni di collasso sul piano del FAD ed il carico effettivamente applicato e rappresenta il coefficiente moltiplicativo per il carico applicato necessario per raggiungere le condizioni limite. Per l'evento critico si farà riferimento alla condizione di inizio di propagazione del difetto.

Definendo una o più situazioni (in termini di caratteristiche meccaniche del materiale, stati di sollecitazione e geometria di difetti), è possibile, applicando la Procedura R6, valutare i Reserve Factor; tale parametro o indici da esso derivati caratterizzano in termini di sicurezza la situazione esaminata, consente di effettuare confronti e valutazioni.

Ipotizzando per le caratteristiche meccaniche del materiale e per lo stato di tensione opportune distribuzioni statistiche ed applicando la Procedura R6 accoppiata ad una simulazione con il Metodo Monte Carlo, si ottiene la distribuzione risultante dei Reserve Factor da cui una stima della probabilità di rottura e dell'affidabilità strutturale.

2. Assicurazione della Qualità nella progettazione

L'introduzione dei coefficienti di sicurezza in sede progettuale consente di superare le incertezze associate ai parametri di progetto (caratteristiche meccaniche del materiale, condizioni operative e di funzionamento) e di affrontare il problema del progetto secondo un approccio deterministico [6, 7, 8, 9, 10]. In tal modo, è garantita la sicurezza globale del componente, si ha una stima del margine di sicurezza ad esso associato ma non ne è fissato il livello di confidenza.

Si può fare una valutazione più efficace con un approccio affidabilistico [6, 11, 12, 13] se si conoscono o si è in grado di ipotizzare le distribuzioni delle incertezze associabili ai parametri di progetto con riferimento alle condizioni operative e ambientali. Questo approccio permette la conoscenza degli effettivi margini di sicurezza e rende possibile effettuare scelte progettuali più mirate.

La Procedura R6 può essere applicata per la progettazione affidabilistica di componenti strutturali per i quali debba essere postulata la presenza di un difetto, valutando gli effetti dell'incertezza dei parametri di progetto sulla sicurezza e sull'affidabilità strutturale.

L'applicazione della Procedura R6 comporta la conoscenza delle caratteristiche meccaniche del materiale (tensione di snervamento, tensione di rottura, tenacità a frattura), lo stato di tensione (tensioni primarie e tensioni secondarie), dimensioni e posizione del difetto.

In fase di progetto per le caratteristiche meccaniche del materiale e per lo stato di tensione viene ipotizzata una opportuna distribuzione statistica; per semplicità si può fare riferimento a distribuzioni normali. La geometria del difetto è ipotizzata e quindi ne sono note le dimensioni (difetto di riferimento).

Utilizzando il Metodo Monte Carlo congiuntamente alla Procedura R6, è possibile determinare la distribuzione risultante dei Reserve Factor e quindi valutare la probabilità di collasso in termini di probabilità che il valore di RF risulti minore dell'unità. Il complemento a uno della probabilità di collasso rappresenta la probabilità che l'elemento strutturale svolga correttamente la funzione a cui è devoluto e quindi ne rappresenta l'affidabilità.

Quando per uno stesso componente la procedura di progetto prescriva di effettuare valutazioni di sicurezza in più zone, l'affidabilità globale del componente è esprimibile dal prodotto delle affidabilità che si determinano in ciascuno dei punti analizzati.

Introducendo i concetti e i metodi della Meccanica della Frattura viene generalizzato l'approccio di progettazione affidabilistica che prevede di confrontare la distribuzione statistica della sollecitazione dovuta ai carichi applicati con la distribuzione statistica della capacità di resistenza del componente (ad esempio in termini di snervamento o di rottura) in quanto è possibile tenere conto dell'importanza delle difettosità interne presenti nel

materiale. La Procedura R6 consente di considerare l'interazione di più meccanismi di cedimento con riferimento alle modalità di frattura fragile e di collasso plastico.

Con la procedura indicata, è possibile effettuare scelte progettuali sostanzialmente legate alla selezione del materiale da impiegare per realizzare il componente. Identificato il tipo di materiale più adatto, si può porre la scelta se privilegiare materiali con caratteristiche meccaniche più elevate (cioé con valori medi più alti) o materiali a caratteristiche meccaniche più ripetibili (cioè con minore dispersione statistica).

La variabilità delle caratteristiche del materiale interagisce con l'incertezza associata alla conoscenza dello stato di tensione.

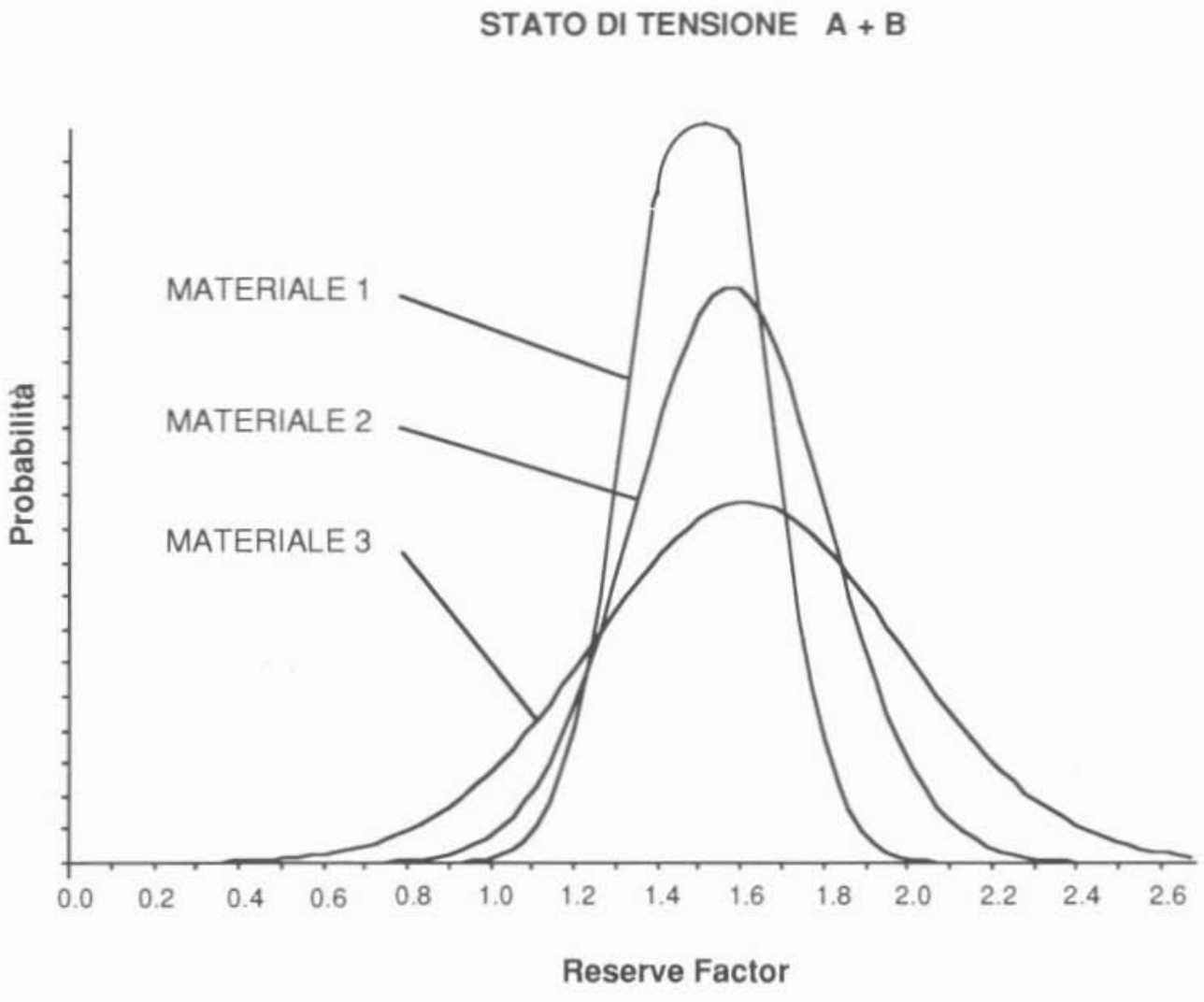

Figura 1
Distribuzione dei Reserve Factor per diversi materiali

Assumendo a riferimento le normative ASME e RCC-M [14, 15], si considerano più condizioni operative, ciascuna delle quali con una probabilità

di accadimento diversa (condizioni Normali + Upset o Livello A+B con probabilità di occorrenza superiore a 10^{-2}; condizione Emergency o Livello C con probabilità superiore a 10^{-4}; condizione Faulted o Livello D con probabilità superiore a 10^{-6}). Alle diverse condizioni operative si associano stati di tensione caratterizzati da valori medi diversi mentre si considera che il coefficiente di variazione ad essi associato sia lo stesso nei diversi casi.

Con riferimento ad un pressurizzatore in acciaio ferritico, la Figura 1 riporta la distribuzione dei Reserve Factor per tre materiali nel caso di condizioni Normal + Upset (A+B). I tre materiali sono caratterizzati rispettivamente da: il materiale 1 possiede caratteristiche meccaniche definite da valori medi più bassi rispetto agli altri ma dispersione inferiore; il materiale 3 ha le caratteristiche più elevate in termini di valori medi ma maggiore dispersione mentre il materiale 2 ha caratteristiche intermedie sia per i valori medi, sia per le dispersioni.

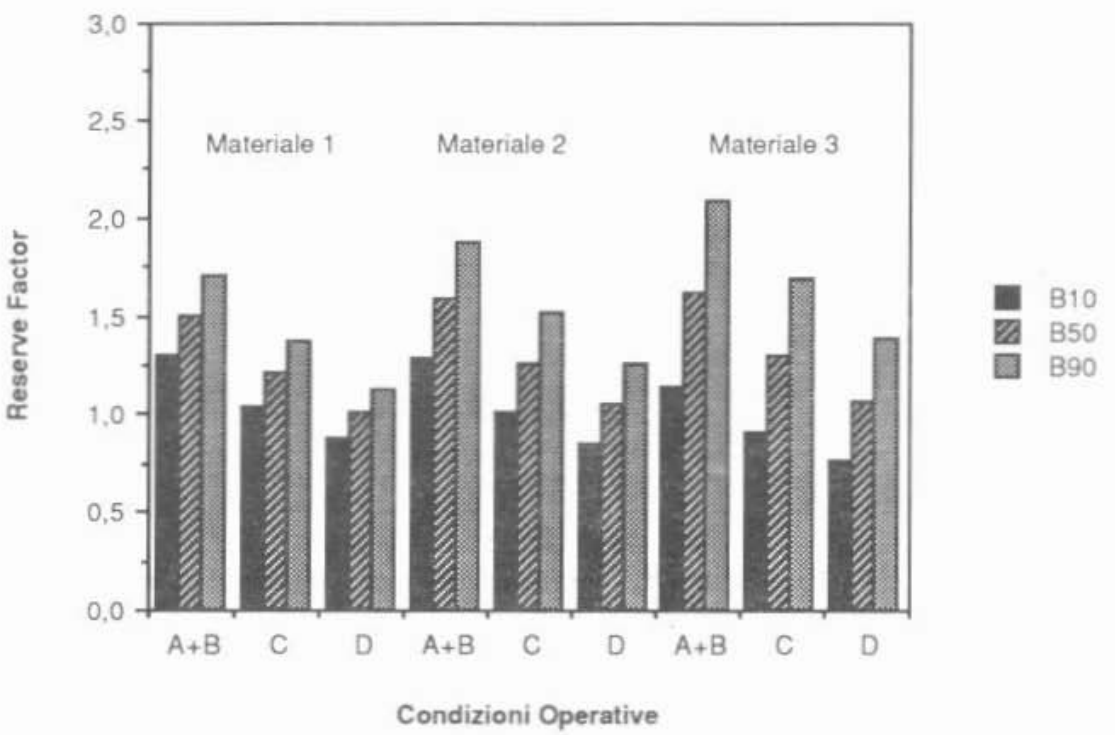

Figura 2
Percentili B10, B50, B90 della distribuzione dei Reserve Factor per diversi materiali e per diverse condizioni operative

La Figura 2 riporta la distribuzione dei Reserve Factor, espressa in termini dei percentili B10, B50, B90, per i tre materiali e per le diverse condizioni operative (Livelli A+B, C e D).

La Figura 3, infine, riporta i valori dell'affidabilità del componente (espressi in termini di complemento a uno della probabilità di collasso) nelle diverse condizioni operative supponendo di realizzarlo con ciascuno dei tre materiali.

Dall'esame delle figure, consegue che ai fini della sicurezza la scelta di un

materiale di caratteristiche più elevate ma meno ripetibili può non essere la scelta ottimale in termini affidabilistici.

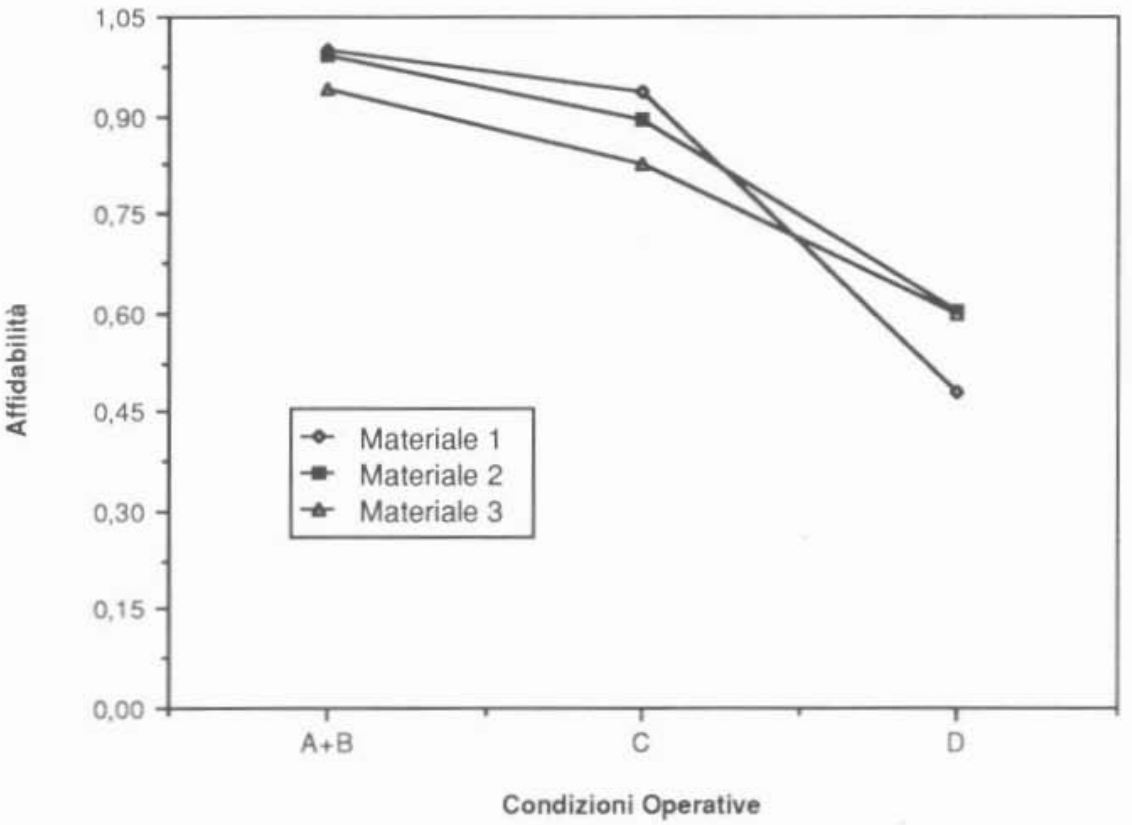

Figura 3
Affidabilità Strutturale nelle diverse condizioni operative per vari materiali

L'approccio affidabilistico che utilizza la Procedura R6 consente anche di inferire sulla probabilità di collasso di un componente per il quale si ipotizzi la potenziale presenza di difetti: in questo caso la probabilità di esistenza di cricche di diverse forme e dimensioni interagisce con la probabilità di occorrenza di determinate condizioni operative e con l'incertezza associata alla conoscenza delle caratteristiche del materiale [13]. Si può ipotizzare una opportuna distribuzione delle dimensioni dei difetti potenzialmente presenti (in dipendenza della frequenza di occorrenza di difetti di fabbricazione e della probabilità dei difetti di non essere rilevati dai controlli nelle fasi di manufacturing, pre-service, in-service inspection) ed un'opportuna distribuzione dei carichi applicati (funzione della frequenza di occorrenza di determinate condizioni di funzionamento) ed applicare la procedura descritta tenendo conto anche dell'incertezza associata alla conoscenza delle caratteristiche del materiale. E' da notare comunque che il Metodo Monte

Carlo richiede per distribuzioni che abbracciano campi numerici molto ampi un numero molto elevato di simulazioni. In tali casi può allora risultare opportuno simulare separatamente le diverse situazioni (le diverse condizioni operative di funzionamento e i difetti di dimensioni diverse potenzialmente presenti), determinando per ciascuna la relativa probabilità di collasso. La probabilità di collasso ricercata sarà ottenibile sommando i prodotti della probabilità di collasso relativa a ciascun evento per la probabilità di occorrenza dell'evento.

Ad esempio considerando le condizioni operative associate ai livelli A+B, C, D e dette rispettivamente $P_{f(A+B)}$, $P_{f(C)}$, $P_{f(D)}$ le probabilità di collasso ad essi relative (dovute all'interazione delle incertezze relative alle caratteristiche del materiale, alle condizioni di funzionamento stesse ed eventualmente alle dimensioni dei difetti) e P(A+B), P(C), P(D) le probabilità di occorrenza di ciascuno dei livelli di funzionamento, quanto detto si esprimerà:

$$P_{fGlobale} = P_{f(A+B)}\,P(A+B) + P_{f(C)}\,P(C) + P_{f(D)}\,P(D)$$

Analogamente considerando n difetti di dimensioni $a_1, a_2, \ldots, a_n$ ciascuno dei quali con una probabilità $P(a_i)$ di trovarsi all'interno della struttura, determinate le probabilità di collasso $P_{f(ai)}$ relative a ciascuno di essi (dovute all'interazione delle incertezze relative alle caratteristiche del materiale, alle condizioni di funzionamento ed alle dimensioni dei difetti), si esprimerà:

$$P_{fGlobale} = P_{f(a1)}\,P(a_1) + \ldots\ldots + P_{f(an)}\,P(a_n)$$

Combinando i due casi precedenti, si può scrivere:

$$\begin{aligned} P_{fGlobale} = {} & \{P_{f(a1)}P(a_1) + \ldots\ldots + P_{f(an)}P(a_n)\}_{(A+B)}\,P(A+B) + \{P_{f(a1)}P(a_1) + \\ & + \ldots\ldots + P_{f(an)}P(a_n)\}_{(C)}\,P(C) + \{P_{f(a1)}P(a_1) + \ldots\ldots + \\ & P_{f(an)}P(a_n)\}_{(D)}\,P(D) \end{aligned}$$

3. Assicurazione della Qualità nelle Ispezioni in Servizio

Lo scopo dei controlli non distruttivi è quello di identificare le dimensioni e la posizione dei difetti all'interno di componenti strutturali; i difetti rilevati vengono confrontati con difetti ammissibili definiti da specifiche normative il cui obiettivo è quello di discriminare i difetti potenzialmente pericolosi per la sicurezza delle strutture.

Ciascuna normativa garantisce quindi l'integrità strutturale introducendo le dimensioni limite per i difetti con un coefficiente di sicurezza che consente di superare le incertezze relative alla degradazione delle caratteristiche meccaniche del materiale per effetto dell'esercizio, le incertezze relative alle condizioni operative e di funzionamento, le incertezze relative alla precisione con la quale le tecniche di controllo non distruttivo determinano dimensioni e posizione dei difetti e alla loro probabilità di rilevamento.

Un approccio che utilizzi la Procedura R6 consente di valutare i margini di sicurezza delle strutture in presenza dei massimi difetti tollerati dalle diverse

normative e di eseguire quantitativamente confronti in termini di livello di danno tollerato.

Lo stesso tipo di approccio può essere applicato alla qualificazione di tecniche, di procedure, di team di controlli non distruttivi, associando a ciascuno di essi opportuni indici di qualità. Si può infatti impiegare la Procedura R6 per analizzare i difetti rilevati con diverse tecniche, con diverse procedure, da diversi team di controllo associando a ciascun difetto un suo margine di sicurezza in dipendenza del livello di danno indotto nella struttura.

Le problematiche dell'Assicurazione della Qualità nelle Ispezioni in Servizio possono essere affrontate utilizzando un approccio statistico che preveda di considerare l'incertezza associata alla rilevazione delle dimensioni e della localizzazione dei difetti associabile alle rilevazioni mediante NDT. Le dimensioni e la posizione dei difetti saranno definite, anzichè in modo deterministico, in modo statistico attraverso il loro valore medio ed il loro scarto.

E' opportuno tenere presente che le problematiche connesse ai controlli non distruttivi sono sostanzialmente individuate dalle condizioni geometriche locali della zona soggetta al controllo mentre una valutazione con la Meccanica della Frattura comporta definizioni di carattere funzionale quale la definizione delle condizioni di collasso e la conoscenza delle condizioni operative di funzionamento della struttura. Tale definizione è rilevante ai fini di una corretta valutazione dei margini di sicurezza; pertanto é opportuno analizzare approfonditamente il problema, definirne correttamente i limiti e, individuate le condizioni di riferimento, verificarne l'idoneità a caratterizzare con il necessario grado di generalità la o le condizioni da prendere in esame.

L'esigenza di dover definire uno stato di tensione che sia di riferimento per poter effettuare correttamente confronti fra situazioni diverse, può suggerire l'opportunità di considerare come stato di tensione di riferimento un insieme di stati di tensione che nel loro complesso possano essere considerati rappresentativi di tutte le configurazioni possibili. Per ottenere una rappresentazione sintetica che consenta di associare a ciascuna ciascuna configurazione geometrica definita tramite NDT un solo parametro indicativo della riduzione dell'integrità strutturale da essa indotto può essere necessario comporre l'insieme dei Reserve Factor ottenibili applicando la Procedura R6.

Nell'ambito di una valutazione e qualificazione di risultati provenienti dal Programma PISC II [16], si è configurata la necessità di analizzare la normativa ASME - Section XI. E' stata eseguita un'analisi in forma estesa della Table IWB-3510-1 che si riferisce a saldature in vessel in acciaio ferritico. Sono state ricavate le massime dimensioni tollerabili per i difetti rispettivamente superficiali e interni per diverse posizioni all'interno dello spessore (definite conformemente alle ASME dal parametro adimensionale Y dato dal rapporto tra la minima distanza del difetto dalla superficie e la sua semilarghezza a) e per diversi valori dello spessore.

Sono stati analizzati spessori da 25 a 600 mm rappresentativi delle classi dimensionali indicate dalla normativa e di tutte le possibili situazioni reali.

Applicando la Procedura R6 ad ogni difetto corrisponde un punto (o insieme di punti) nel piano del FAD. La Figura 4, riportata a titolo di esempio, è rappresentativa di tutte le situazioni esaminate. Dall'esame della figura appare come tutte le configurazioni limite occupano una zona ben delimitata del piano FAD sia in termini di distanza dalla Failure Assessment Line (zone A, B, C, D occupate rispettivamente da difetti in sicurezza ed accettabili, da

difetti in sicurezza ed al limite dell'accettabilità, da difetti in sicurezza ma non accettabili, da difetti non in sicurezza e non accettabili), che in termini di meccanismo di collasso.

Il margine di sicurezza associabile a ogni punto nel piano R6 può essere considerato come un indice caratterizzante il difetto analizzato. Si può osservare (Figura 5) che il margine di sicurezza assume valori che occupano una fascia ben definita che si conserva al variare del tipo, della geometria, della posizione dei difetti limite definiti dalle ASME anche considerando componenti di spessori diversi.

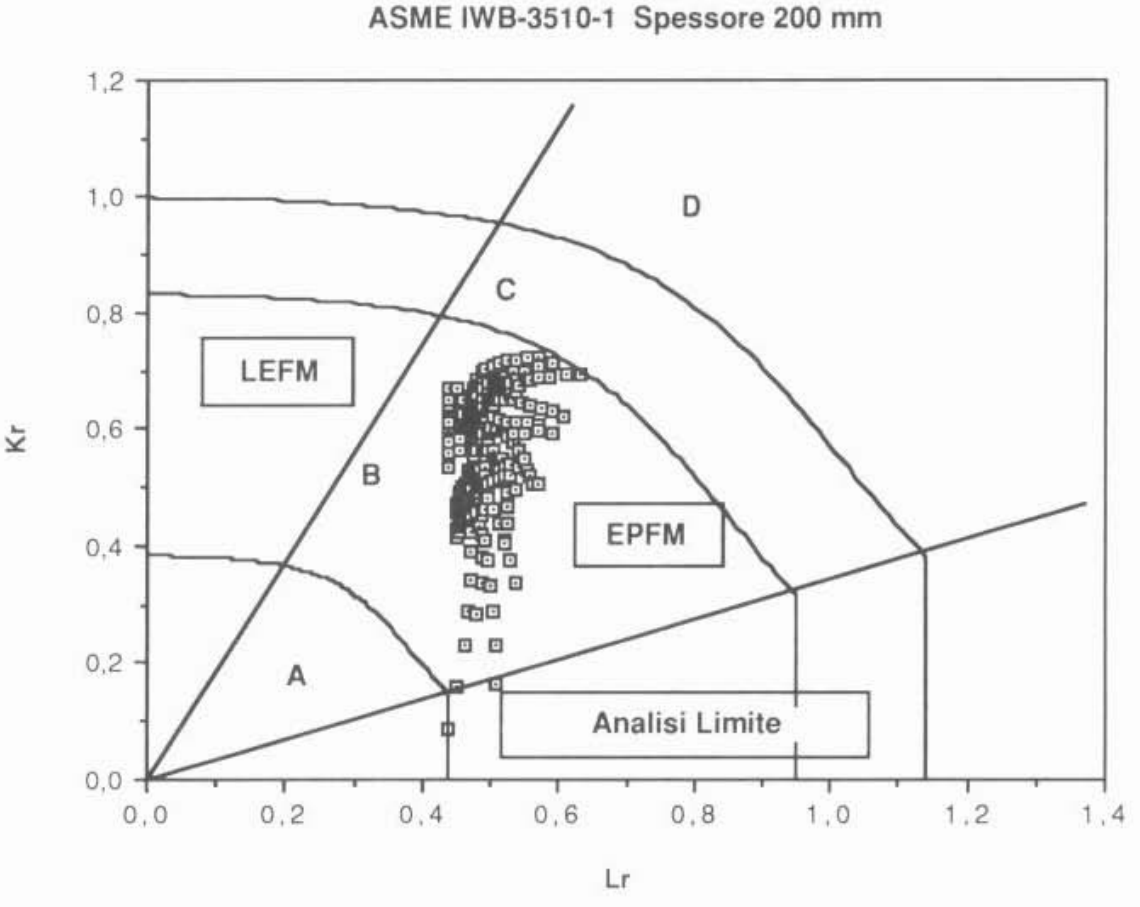

Figura 4
Rappresentazione nel Piano R6 delle prescrizioni di ASME-Section XI-Table IWB-3510-1

Il margine di sicurezza (o indici ad esso correlati) rappresenta in forma sintetica una prescrizione di una norma evidenziandone il coefficiente di sicurezza implicito e può essere significativamente utilizzato per effettuare analisi e confronti.

Fissata una normativa si possono esaminare e confrontare prescrizioni che si riferiscono a componenti e a materiali diversi, evidenziando in tal modo la

filosofia intrinseca della norma. Definito componente e il tipo di applicazione si possono esaminare e confrontare normative diverse.

Gli autori, nell'ambito della attività finanziata dalla CEE e svolta in collaborazione con l'ANSALDO, hanno applicato questo tipo di analisi per eseguire il confronto tra alcune normative europee di Manufacturing con riferimento ad un giunto saldato [17, 18] ; e stanno sviluppando un confronto tra le due normative di Pre-Service ASME [14] e RSEM [19] con riferimento ad alcuni componenti di interesse nucleare.

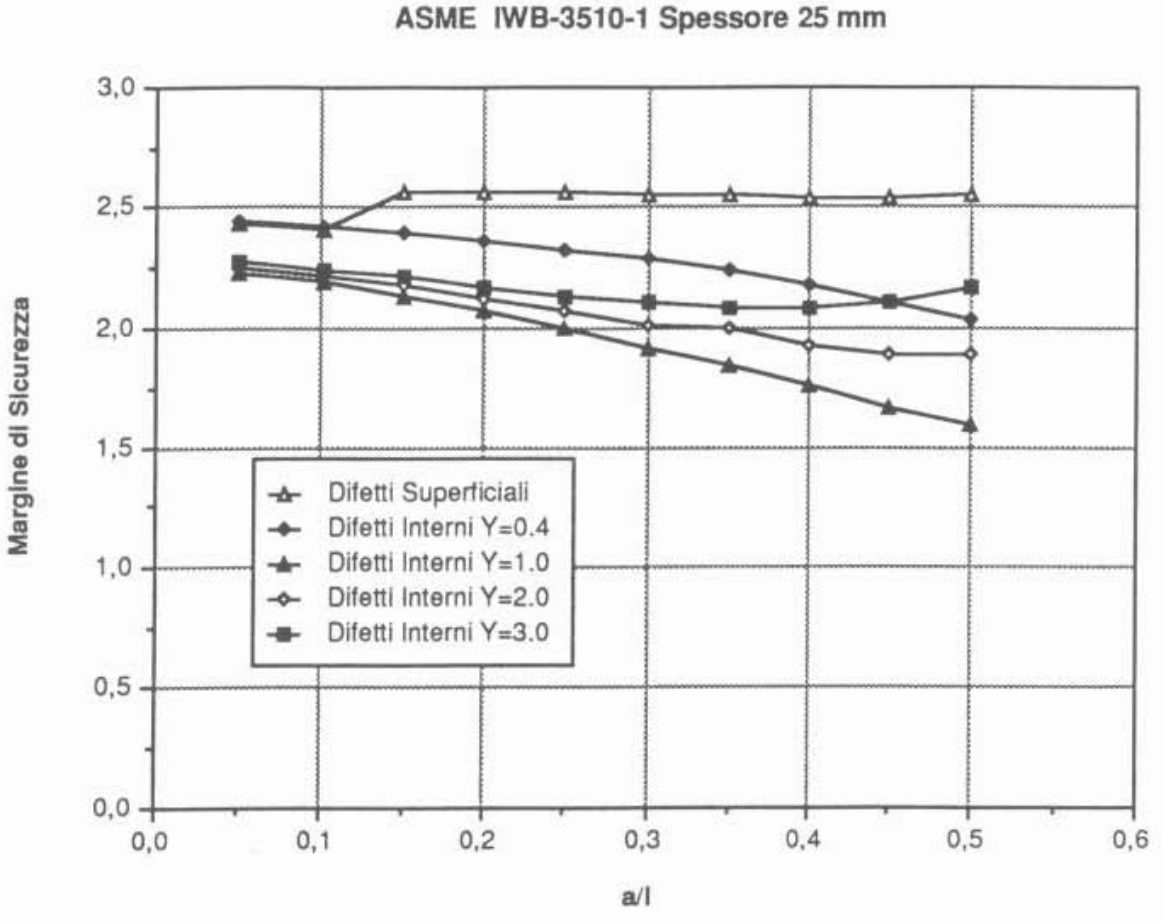

Figura 5
Margine di Sicurezza dei difetti limite prescritti da ASME-Section XI-Table IWB-3510-1

All'interno di una collaborazione con il CCR di ISPRA nell'ambito del programma PISC, è stato sviluppato un approccio analogo volto alla qualificazione di tecniche, di procedure , di team di controlli non distruttivi [16]. Viene impiegata la Procedura R6 per analizzare i difetti rilevati nei blocchi oggetto del Round Robin da diversi team [20, 21] associando a ciascun difetto il suo margine di sicurezza. I margini di sicurezza così ottenuti possono essere confrontati tra loro oppure con il margine di sicurezza dei difetti effettivamente presenti nella struttura (Figura 6).

Potranno quindi essere eseguite delle valutazioni quantitative e dei confronti

del livello di qualità di ciascuna tecnica o team una volta stabilita la funzione obbiettivo, cioè a seconda che si intenda privilegiare considerazioni di sicurezza, considerazioni di carattere tecnico, considerazioni di carattere economico. Nel primo caso infatti, in cui l'importanza della sicurezza è preponderante sul resto, si tenderà ad attribuire indici di qualità superiori a rilevazioni che sovrastimano i difetti rispetto a rilevazioni che li sottostimano della stessa entità. Nel secondo caso, in cui si privilegiano considerazioni di carattere tecnico, si tenderà ad attribuire uguali indici di qualità a rilevazioni che sovrastimano e a rilevazioni che sottostimano della stessa entità i difetti. Infine riferendosi a considerazioni di carattere economico, si tenderà ad attribuire indici di qualità superiori a rilevazioni che sottostimano i difetti rispetto a rilevazioni che sovrastimano della stessa entità i difetti.

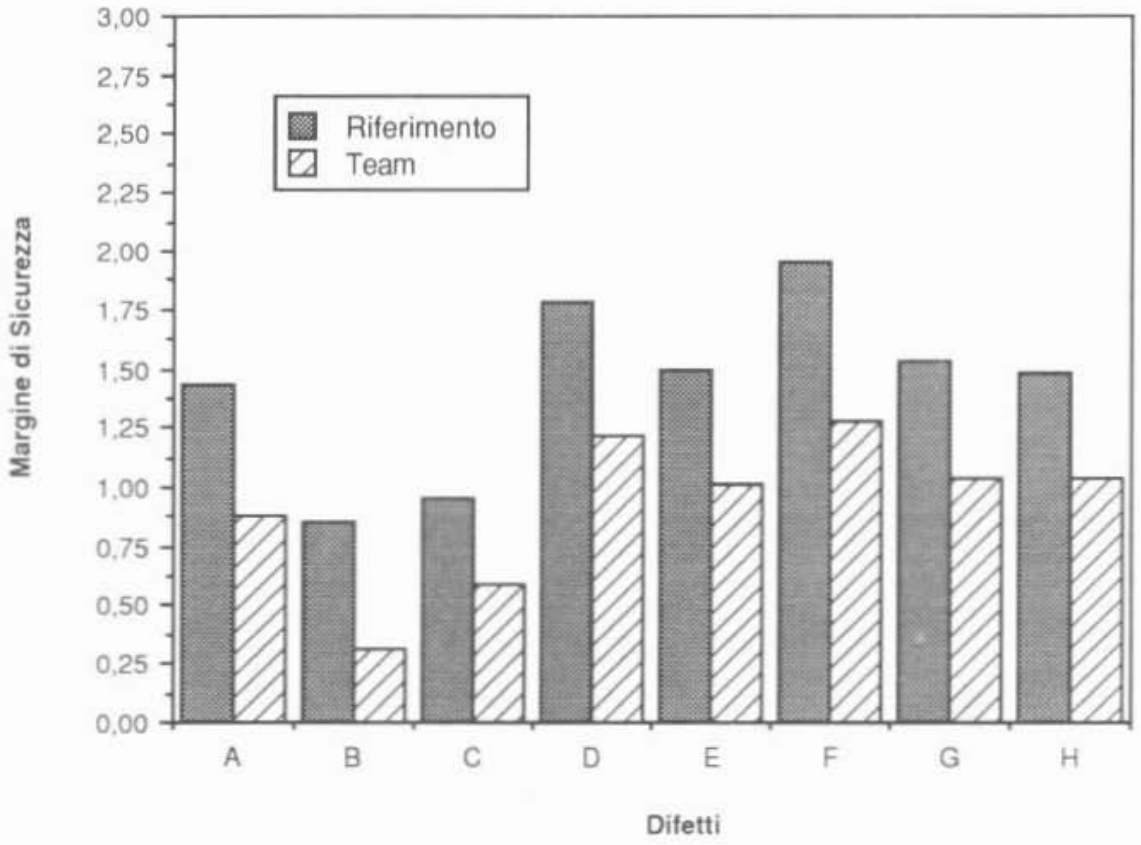

Figura 6
Margini di Sicurezza relativi ai Difetti Stimati ed ai Difetti di Riferimento

La qualificazione di tecniche, di procedure, di team di controlli non distruttivi può essere effettuata efficacemente utilizzando la stessa metodologia con un approccio statistico che consenta di tenere conto della distribuzione degli errori di misura associati alle rilevazioni. Le incertezze relative alle dimensioni dei difetti, dovute agli errori di misura associati alle rilevazioni

tramite NDT, interagiscono con le incertezze relative alle caratteristiche del materiale e con le incertezze relative alle condizioni operative. Nell'analisi risulta opportuno considerare, e l'approccio lo consente, anche il problema della degradazione delle caratteristiche meccaniche del materiale dovute all'esercizio che comporta una riduzione dei valori medi ed un incremento della variabilità sia per la maggiore dispersione propria dei risultati, sia per le difficoltà di effettuare valutazioni affidabili.

Si sono considerati, a titolo esemplificativo, tre risultati-tipo ottenibili dai controlli non distruttivi, rappresentativi di performance di tecniche, di procedure o di team. La configurazione "0" indica la configurazione effettiva del difetto (noto in dimensione e posizione), la configurazione "1" si riferisce ad una sottostima del difetto, la configurazione "2" ad una sovrastima del difetto mentre la configurazione "3" si riferisce all'esatto dimensionamento del difetto. La rilevazione "1" è affetta dalla maggiore incertezza (coefficiente di variazione massimo), la rilevazione "3" è invece la meno incerta; l'incertezza della rilevazione "2" è intermedia tra le precedenti. Riferendosi ad un pressurizzatore in acciaio ferritico, si ipotizza per le caratteristiche meccaniche del materiale e per lo stato di tensione distribuzioni normali. Applicando la Procedura R6 accoppiata ad una simulazione con il Metodo Monte Carlo si ottengono i risultati sintetizzati nelle Figure 7 e 8.

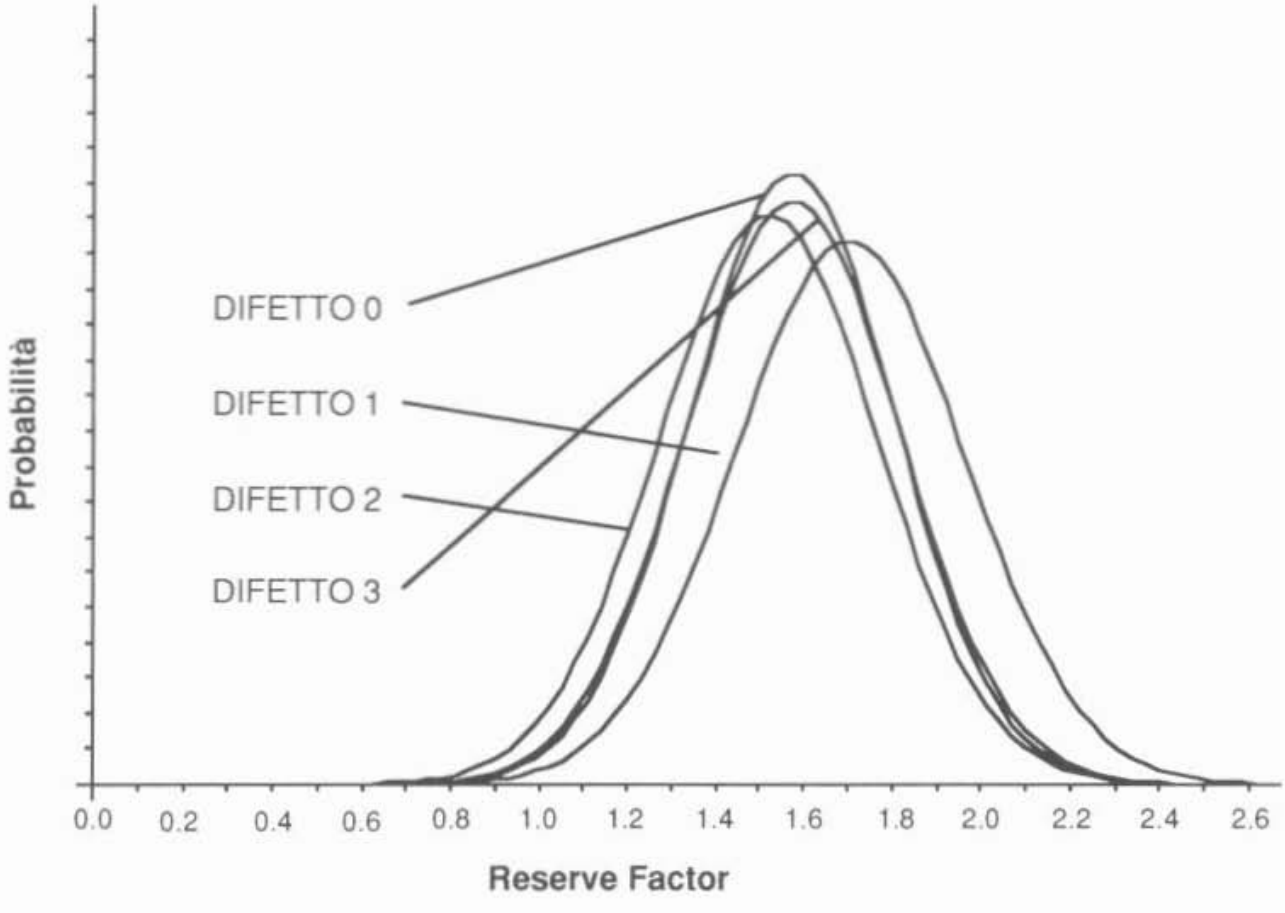

Figura 7
Distribuzione Reserve Factor per diverse rilevazioni del Difetto 0

La Figura 7 riporta la distribuzione dei Reserve Factor e la Figura 8 i valori dell'affidabilità del componente ipotizzando la presenza di ciascuno dei difetti sopra descritti.

Si può osservare come a parità di ogni altra condizione (caratteristiche meccaniche del materiale e condizioni operative) i risultati dell'esame non distruttivo possono indurre a valutazioni diverse della sicurezza e dell'affidabilità del componente. Si possono quindi ricavare indici di merito per la valutazione delle performance tenendo conto in termini affidabilistici delle conseguenze associate a ciascuna rilevazione.

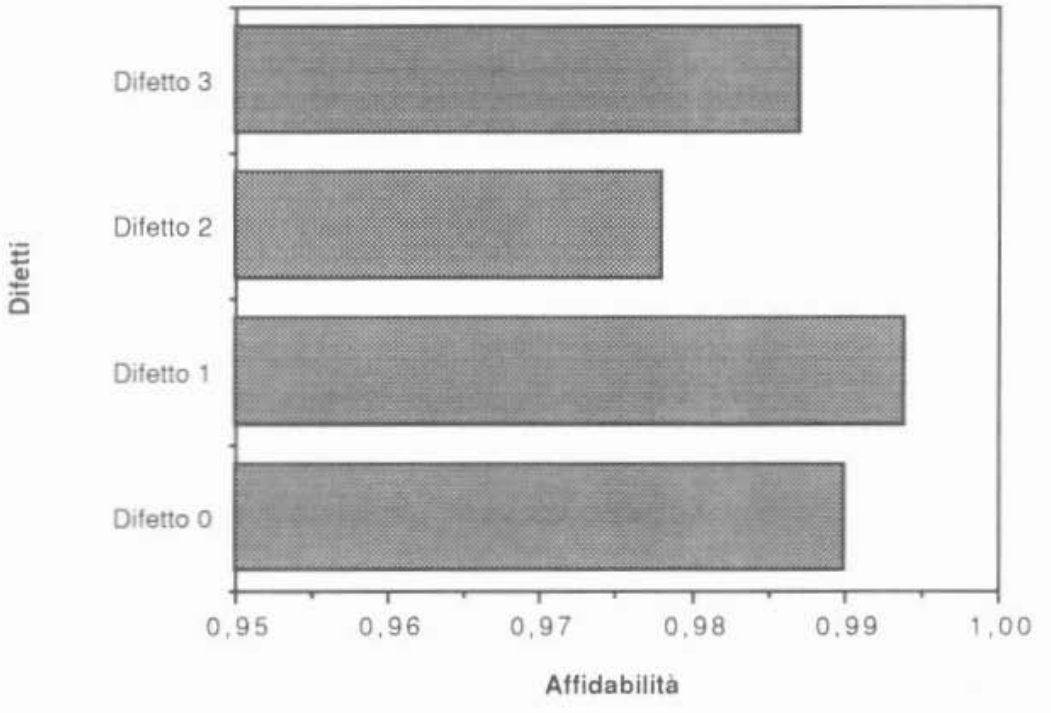

Figura 8
Affidabilità Strutturale per diverse rilevazioni del Difetto 0

4. Conclusioni

Nell'ambito della progettazione di componenti strutturali che prevedano delle verifiche con la Meccanica della Frattura, può risultare vantaggioso applicare una metodologia affidabilistica che utilizzi la Procedura R6 accoppiata all'utilizzo di una tecnica di simulazione numerica come il Metodo Monte Carlo.

Si può rendere così più efficace (e quindi aumentare la qualità del prodotto finale) la procedura di progetto introducendovi la possibilità di tenere in considerazione le incertezze relative ai parametri di progetto (caratteristiche meccaniche del materiale e condizioni operative di funzionamento) e

valutandone le conseguenze in termini di probabilità di collasso e di affidabilità strutturale.

Viene generalizzato l'approccio di progettazione affidabilistica che prevede di confrontare la distribuzione statistica della sollecitazione dovuta ai carichi applicati con la distribuzione statistica della capacità di resistenza del componente. Vengono introdotti i concetti e i metodi della Meccanica della Frattura che consentono di tenere conto dell'importanza delle difettosità interne presenti nel materiale. La Procedura R6 permette di considerare l'interazione di più meccanismi di cedimento con riferimento alle modalità di frattura fragile e di collasso plastico.

Nell'ambito dell'Assicurazione della Qualità delle Ispezioni in Servizio, i concetti e i metodi della Meccanica della Frattura, con particolare riferimento alla Procedura R6, possono essere utilizzati per la qualificazione e il confronto, in termini di margini di sicurezza, di normative di NDT che fissano le dimensioni limite per i difetti tollerabili all'interno delle strutture ai fini di garantirne la necessaria sicurezza ed integrità strutturale. Lo stesso strumento può essere applicato per la valutazione di performance di tecniche, di procedure, di team rilevanti ai fini della garanzia della sicurezza delle strutture.

La Procedura R6 ed una simulazione numerica con il Metodo Monte Carlo possono essere utilmente impiegati anche in un approccio statistico che consideri le incertezze associate alle rilevazioni effettuate tramite NDT, tenendo conto degli errori di misura che possono essere commessi nella determinazione delle dimensioni e della posizione dei difetti. Le valutazioni e i confronti eseguiti in termini deterministici di integrità strutturale possono essere effettuati in termini di stime della probabilità di collasso e dell'affidabilità strutturale.

Ringraziamenti

L'attività ha trovato stimolo e supporto dalla proficua collaborazione tecnica con l' ANSALDO S.p.A. e con il Centro Comune di Ricerca di Ispra.

Gli Autori ringraziano per i suggerimenti e per le utili e continue discussioni Francesco Alicino (Alicino & Cornaggia snc), Eugenio Capurro (ANSALDO S.p.A.), Serge Crutzen (CCR Ispra).

Riferimenti Bibliografici

1. Noel R. L., A PWR Pressure Vessel Safety Assessment, NEA/CSNI Workshop, EXPO Finland 1990, CSNI Rep N. 178, Dec. 1991.
2. Crutzen S., Jehenson P., Inspection Performance with a view to Pressure Vessel Life Management, NEA/CSNI Workshop, EXPO Finland 1990, CSNI Rep N. 178, Dec. 1991.
3. Milne I. et alii, Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects. R/H/R6 Rev. 3, CEGB.,1986. Anche in International Journal of Pressure Vessel & Piping vol. 32, 1-4, 1988.
4. Milne I. et alii, Background to and Validation of CEGB Report R/H/R6 Rev.3. R/H/R6

Rev. 3 Validation, CEGB.,1987. Anche in International Journal of Pressure Vessel & Piping vol. 32, 1-4, 1988.

5. Miller A. G., Review of Limit Loads of Structure Containing Defects. R/H/R6 Rev. 3 Validation, CEGB.,1987. Anche in International Journal of Pressure Vessel & Piping vol. 32, 1-4, 1988.
6. Plane C.A., Cowling M.J., Nwegbu V., Burdekin F.M., The determination of safety factors for defect assessment using reliability analysis method", Third Integrity of Offshore Structures Symposium, Glasgow, Sept 1987
7. Burdekin F.M., Garwood S.J., Milne I., The basis for the technical revisions to the fracture clause of PD 6493, Proc.Weld Failures, Nov. 1988.
8. Garwood S.J., Willoughby A.A., Leggatt R.H., Jutla T., Crack Tip Opening Displacement (CTOD) Methods for Fracture Mechanics Assessments: Proposal for Revisions to PD 6493, ASFM 6, Ispra, Sept. 1987.
9. Garwood S.J., Gordon J.R., Worked Examples of CTOD Analysis using the Proposed Revisions to PD 6493, ASFM 6, Ispra, Sept. 1987.
10. Pellisier Tanon A., Pressure Vessel Codes, ASFM 6, Ispra, Sept. 1987.
11. Beranger M., Bruschi R., Curti G., Qualifica di Condotte Danneggiate con Tecniche di Meccanica della Frattura, IGF 6, Ancona, Giugno 1990.
12. Bruschi R., La Civita A., Siliquini A., Tura F., Affidabilità Strutturale delle Condotte Sottomarine: un Approccio Probabilistico alla Meccanica della Frattura, IGF 6, Ancona, Giugno 1990.
13. Nilsson F., Reliability Assessment by Aid of Probabilistic Fracture Mechanics, NEA/CSNI Workshop, EXPO Finland 1990, CSNI Rep N. 178, Dec. 1991.
14. ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Sections III, V, VIII e XI, American Society of Mechanical Engineer, 1990.
15. RCC-M, Regles de Conception et de Construction des Materiels Mecaniques des Ilots Nucleaires PWR, AFCEN, Juin 1988.
16. Reale S., Tognarelli L., Valutazione dei Risultati PISC mediante Metodologie di Meccanica della Frattura, PISC03 Rap. Int. DMTI, Firenze, Apr. 1992.
17. Alicino F. et alii, Valutazione con la Meccanica della Frattura della accettabilità di difetti secondo i controlli non distruttivi, IGF 4, Milano, 1988.
18. Reale S., Corvi A., Capurro E., Comparisons of NDE Standards in the Frame of Fracture Mechanichs Approach, SMIRT 11 Transactions, Vol. G, Tokyo, Giappone, Agosto 1991, to be publ. in Int. J. Pres. Vess. & Piping.
19. RSEM, Regles de Surveillance en Exploitation des Materiels Mecaniques des Ilots Nucleaires R.E.P., AFCEN, Juillet 1990.
20. Crutzen S. et alli, The Major Results of the PISC II RRT, Nuclear Eng. & Design, 115 (1989).
21. PISC II rep. 5, Evaluation of the PISC II trial results, CSNI Rep. n. 121, Sept. 1986; App. 5 to PISC II rep. 5, Detailed Ultrasonic Inspection Results of all team for plate n.2, CSNI Rep. n. 121, Sept. 1986.