

IGF7 - VII Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Firenze, 13 - 14 giugno 1991

IL CRITERIO LEAK BEFORE BREAK NELL'IMPIANTISTICA NUCLEARE

Francesco ALICINO - Leone CORNAGGIA

ALICINO & CORNAGGIA snc
Via G. Amarena, 17/1A- 16143 Genova

SOMMARIO

Vengono brevemente presentate e discusse le motivazioni impiantistiche e le basi teoriche e sperimentali alla base dell'adozione del criterio *Leak Before Break* in campo nucleare. Attenzione è posta alle modalità con cui il criterio è stato implementato negli impianti nucleari provati, adattandolo alle specifiche esigenze impiantistiche (reattori ad acqua leggera, reattori autofertilizzanti) ed ai peculiari requisiti di sicurezza nazionali.

Sono evidenziate le principali implicazioni progettuali; con particolare riferimento alle caratteristiche dei materiali (in termini di tenacità) e alla limitazione della segregazione dei componenti passivi.

PREMESSA

L'adozione del criterio *Leak Before Break* nell'impiantistica nucleare ha tratto, com'è noto, impulso dalle conseguenze dell'assunzione, per ragioni di sicurezza, della possibile rottura franca delle tubazioni come evento base di progetto.

La logica conseguenza di un tale evento, ovvero il rilascio rapido del fluido refrigerante (LOCA), ha a sua volta comportato tutta una serie di problematiche, quali la pressurizzazione della cavità del recipiente a pressione, i getti concentrati d'acqua o i colpi di frusta delle tubazioni, richiedenti appropriate soluzioni impiantistiche.

Ciò ha col tempo provocato una proliferazione di sistemi passivi per l'esercizio dell'impianto, come i "pipe whip restraints" o i "jet impingement shields", con il loro inevitabile corredo di sistemi di controllo. Fenomeno quest'ultimo ulteriormente aggravato dalla continua e pressante richiesta delle competenti autorità nazionali preposte alla sicurezza di prendere in conto, in sede progettuale, la concomitanza di eventi accidentali, quali il sisma di sicuro spegnimento con il LOCA.

Fintantoché l'architettura generale dell'impianto ed il dimensionamento dei principali componenti non hanno subito impatti ingestibili, in termini sia economici che tecnici, l'industria è stata in grado di assorbire la situazione, pur iniziando a sottolineare come il ricorso a sempre nuovi sistemi passivi potesse alla lunga raggiungere scopi opposti a quelli desiderati.

Un primo ripensamento fu originato dalla difficoltà di assorbire gli effetti della combinazione delle forze asimmetriche nella cavità del recipiente a pressione dovute al *blowdown* con i carichi sismici. Di fronte alla possibile mancata qualifica di molti degli impianti in esercizio, la U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC) incaricò il Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) di analizzare la probabilità del verificarsi della cosiddetta *Double End Guillotine Break* (DEGB) sia a causa della crescita diretta di eventuali difetti nel corso della vita operativa che come conseguenza indiretta di altri eventi iniziatori, quali il sisma.

Da tale studio nacque il rapporto NUREG/CR-3660 (/1/) che dimostrò come la probabilità di una rottura del tipo DEGB, sia diretta che indiretta, fosse molto bassa, suggerendo dunque all'USNRC di prendere in seria considerazione l'eliminazione della DEGB come evento base di progetto *in favor of more realistic criteria*. Il criterio più realistico era appunto il *Leak Before Break*.

METODOLOGIA E BASI TEORICO-SPERIMENTALI

Il meccanismo responsabile della rottura di una tubazione (sia essa del tipo *leak* che del tipo DEGB) è la crescita (per fatica e/o per *creep*, nel caso dei reattori a sodio) dei difetti eventualmente presenti nei giunti saldati. A causa dei cicli di carico operativi (ad esempio: *Heat-up, Cool-down*), così come di eventi accidentali di natura ciclica (sisma), i difetti possono accrescersi sino a una dimensione critica, raggiunta la quale può sopravvenire il collasso. Nelle applicazioni di *Leak Before Break* vengono utilizzati il criterio di collasso della sezione residua (*Net Section Collapse*) ed il criterio della *Tearing Instability*; le leggi di accrescimento per fatica o per *creep*-fatica usualmente adottate si basano tutte sulla classica legge di Paris (si vedano al riguardo i riferimenti da /2/ a /10/).

L'applicazione, in un contesto probabilistico, dei concetti di meccanica della frattura sopra evocati, ha indicato che:

- a) la probabilità media di una rottura DEGB in un circuito primario PWR del tipo Westinghouse è di circa 4.4×10^{-12} eventi anno-impianto, con un limite superiore di 1.2×10^{-10} (/1/);
- b) la probabilità media di *leak* (difetto passante, ma non critico) in un circuito primario PWR è di circa 1.1×10^{-7} eventi anno-impianto, con un limite superiore di circa 2.0×10^{-7} (/1/).

La questione più ampiamente dibattuta riguarda la possibilità che i difetti superficiali di tipo circonferenziale possano propagarsi in lunghezza invece che in profondità. Qualora ciò accadesse, è ovvio che verrebbe meno il presupposto fondamentale del criterio: il difetto potrebbe diventare critico, prima che passante, e dunque esso non sarebbe rilevabile attraverso il controllo del tasso di fuga. La demarcazione tra l'una o l'altra possibilità è legata a molteplici fattori, tra i quali è bene citare il rapporto tra lunghezza del difetto e sua profondità relativa.

Essenzialmente quest'ultimo fattore ha fatto sì che in molte nazioni il criterio sia stato adottato solo parzialmente o non adottato del tutto, anche se l'intensa campagna di studio e di sperimentazione condotta negli Stati Uniti tende a dimostrare la validità generale del criterio nelle applicazioni correnti. Di fondamentale importanza nell'applicazione della metodologia sono i seguenti aspetti:

- le dimensioni iniziali assunte per i difetti (si assume in genere una lunghezza circonferenziale pari a 3 volte lo spessore),
- la stima *a priori* dell'evoluzione dei cicli di carico (e, nel caso di reattori a sodio, la combinazione tra eventi che provocano solo affaticamento ed eventi che provocano anche il danneggiamento per

- creep*),
- la sensibilità dei sistemi di rilevamento delle perdite,
 - il meccanismo di accrescimento ipotizzato, soprattutto nel tener conto della crescita in lunghezza oltre che in profondità del difetto,
 - la selezione delle condizioni di carico più pessimiste per le diverse situazioni analizzate (ad esempio, mentre nel calcolo del difetto critico si dovrà ipotizzare la condizione di carico più gravosa, al fine di minimizzare le dimensioni critiche, nel calcolo del tasso di fuga si dovrà fare riferimento alla condizione operativa meno severa, al fine di minimizzare l'apertura del difetto ed il tasso di fuga stesso).

IMPLICAZIONI PROGETTUALI

L'applicazione del criterio *Leak Before Break* comporta una serie di implicazioni progettuali di notevole rilievo. Si segnalano in questa breve nota quelle che appaiono essere le più significative:

- a) Migliore disposizione impiantistica, maggiore facilità di ispezione e controllo, grazie al decongestionamento dell'impianto ottenuto eliminando elementi quali *Pipe Whip Restraints* e *Jet Impingement Shields*. Riduzione dell'esposizione alle radiazioni del personale.
- b) Più accurata selezione del materiale (nelle applicazioni corrente si richiede ad esempio $E_{CV} > 100$ Joule), sua qualifica in termini di tenacità in temperatura (curva J-R), più accurati procedimenti di saldatura (TIG e SMAW) e di fabbricazione (utilizzo di materiale forgiato anche per le curve).
- c) Controlli non-distruttivi estesi al 100% delle saldature, sia in fase di *pre-service* che di *in-service inspection*.
- d) Accuratezza del sistema di rilevamento delle fughe.
- e) Necessità di eseguire analisi di meccanica della frattura.

Per quanto concerne l'aspetto analitico è interessante notare che vengono, nella pratica PWR, adottati i seguenti coefficienti di sicurezza:

- 10 sulla capacità di rilevazione delle fughe
- 2 sulle dimensioni critiche dei difetti.

Le implicazioni progettuali sopra delineate riflettono molto la tendenza italiana, dato che in USA ad esempio non è richiesto l'uso del forgiato.

E' molto interessante soffermare l'attenzione sul fatto che, laddove la questione della direzione prevalente di crescita del difetto sia stata risolta (e questo è sempre possibile con analisi specifiche), l'adozione di tale criterio, con tutto il suo corollario di implicazioni impiantistiche evocate, tende a migliorare la sicurezza di esercizio, sostituendo al concetto della quantità dei sistemi di intervento, la qualità dei materiali della progettazione e dei controlli e soprattutto garantendo l'intervento in una fase iniziale e non quando l'incidente è già avvenuto.

APPLICAZIONE DEL CRITERIO

Il criterio è riconosciuto valido ed estesamente applicato negli Stati Uniti, ove si è proceduto alla revisione della GDG-4 che permette ora di eliminare l'ipotesi di rottura franca delle tubazioni qualora si dimostri, con appropriate analisi di meccanica

della frattura, la tendenza dei difetti a diventare passanti e a causare perdite evidenziabili con un coefficiente di sicurezza 10, prima di diventare critici (con un coefficiente di sicurezza 2 per il circuito primario).

Più articolata è la posizione di altre nazioni, quali la Germania ove il criterio è adottato sia pure con qualche modifica, essenzialmente orientata ad accrescere i margini di sicurezza dei componenti più importanti. Molto simile era la posizione italiana, dove il criterio, pur riconosciuto valido nella sua architettura generale, si è applicato in modo meno estensivo, rispetto alla stessa Germania.

La metodologia brevemente descritta è nata in margine ai reattori tipo PWR, ma è stata estesamente applicata, anche in talia (/9/ e /10/), altresì a reattori del tipo acqua bollente e del tipo autofertilizzante.

BIBLIOGRAFIA

- /1/ NUREG/CR-3660 - UCID 19988
"Probability of Pipe failure in the Reactor Coolant loops of Westinghouse PWR Plants" - G.S. Holman and C.K. Chou - LLNL, July 1985
- /2/ H. Tada, P. Paris, and R. Gamble - "Stability Analysis of Circumferential Cracks in reactor Piping Systems" - USNRC Report NUREG/CR-0838, Washington, D.C., June 1979
- /3/ D.O. Harris, E.Y. Lim, D.D. Dedhia, H.H. Woo, and C.K. Chou - "Fracture Mechanics Models Developed for Piping Reliability Assessment in Light Water Reactors" - LLNL, Calif., UCRL-15490, USNRC Report NUREG/CR-2301, Washington, D.C., April 1982
- /4/ V. Kumar, M.D. German, and C.F. Shih - "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis" - EPRI NP-1931, July 1981
- /5/ P.C. Paris, et al. - "A treatment of the Subject of Tearing Instability" - NUREG-0311, Aug. 1977
- /6/ P.C. Paris, and H. Tada - "The Application of Fracture Proof Design Methods using Tearing-Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential Through-Wall Cracks" - NUREG / CR-3464, Sept. 1983
- /7/ S. Ranganath, and H.S. Metha - "Engineering Methods for the Assessment of Ductile Fracture Margin in Nuclear Power Plant Piping" - Elastic-Plastic Fracture, Second Symposium, Vol. II - ASTM STP 803, Oct. 1981.
- /8/ H. Abe, and S. Shimoyashiki - "Time Dependent Crack-Growth of Type 304 Stainless Steel in Elevated Temperature Sodium" - Engineering Fracture Mechanics, Vol. 26, Number 5, 1987.
- /9/ F. Alicino, S. Chiochio - "Fracture Mechanics Evaluation of Credible Breaks in Heavy water Reactor Liquid and Steam Primary Lines" - X International Conference on SMIRT, Los Angeles, Aug. 14-18, 1989
- /10/ F. Alicino, S. Cardini - "Fast Breeder Reactors Secondary Piping Potential Sodium Leakage Rate Assessment" - X International Conference on SMIRT, Los Angeles, Aug. 14-18, 1989