

SIMULAZIONE NUMERICA DEL COMPORTAMENTO A FRATTURA DI TUBAZIONI CRICCATE E VERIFICA DEL CRITERIO GE-EPRI ENGINEERING APPROACH

Pietro Paolo Milella(1) , Ester Franzese(2) e Nicola Bonora(2)

(1) ANPA – Agenzia Nazionale per la Protezione dell’Ambiente, Via V. Brancati 48, Roma

(2) Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Cassino ,

Via G. Di Biasio 43, 03043 Cassino

Sommario:

La presente memoria illustra alcuni dei risultati ottenuti in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università di Cassino rianalizzando i dati sperimentali dell’ENEA/DISP relativi alle ricerche di sicurezza in campo meccanico condotte dal 1979 al 1987 nel quadro del PUN (*Programma Unificato Nucleare*). Le ricerche in questione riguardano, in particolare, il comportamento a frattura delle tubazioni in acciaio al carbonio, tipo A 106 B, a temperatura ambiente. La necessità dello studio nasceva all’esigenza di sicurezza, irrinunciabile in campo nucleare, che in nessuna condizione d’esercizio le tubazioni del circuito primario, contenenti acqua contaminata da radioisotopi di fissione, potessero cedere in maniera catastrofica ed anticipava quella che sarebbe diventata la filosofia del LBB (*Leak Before Break*) che avrebbe privilegiato la logica dei controlli non distruttivi su quella di progetto che assumeva la cosiddetta rottura a ghigliottina dei tubi, ovvero il loro tranciamento netto. Le prove sperimentali, eseguite su tubazioni da 4, 6 ed 8 pollici di diametro e vari spessori, erano condotte su spezzoni di tubo di oltre 2 m di lunghezza sottoponendo la sezione criccata a momento puro mediante flessione su 4 punti. In particolare, la memoria esamina il criterio dell’EPRI GE-Engineering approach (EPRI-GE) e ne confronta le previsioni, ottenute su tubazioni da 4" ed 11 mm di spessore contenenti cricche passanti da 90, 135 e 180°, con quelle provenienti dal calcolo tridimensionale agli elementi finiti (FEM).

Abstract: The paper presents some of the results obtained in collaboration with the Industrial Engineering Dept. of the University of Cassino analysing the ENEA(DISP experimental data relative to the research on the safeness of mechanical applications performed between 1979 and 1987. The research is focused on fracture performance of steel pipe type A106B, at room temperature. In this paper the GE EPRI engineering approach is examined and its prediction are compared with tridimensional finite element analyses on 4" and 11 mm thick pipe hosting 90°, 135° and 180° through wall cracks.

1. Introduzione

La presente memoria illustra, sinteticamente, alcuni dei risultati ottenuti in collaborazione tra l’ANPA ed il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università di Cassino rianalizzando i dati sperimentali dell’ENEA/DISP (oggi ANPA) relativi alle ricerche di sicurezza in campo meccanico condotte dal 1979 al 1987 nel quadro del PUN (*Programma Unificato Nucleare*). Le ricerche in questione riguardano, in particolare, il comportamento a frattura delle tubazioni in acciaio al carbonio, tipo A 106 B, a temperatura ambiente. La necessità dello studio nasceva dall’esigenza di sicurezza, irrinunciabile in campo nucleare, che in nessuna condizione d’esercizio le tubazioni del circuito primario, contenenti acqua contaminata da

radioisotopi di fissione, potessero cedere in maniera catastrofica ed anticipava quella che sarebbe diventata la filosofia del LBB (*Leak Before Break*) che avrebbe privilegiato la logica dei controlli non distruttivi su quella che assumeva la cosiddetta rottura a ghigliottina dei tubi, ovvero il loro tranciamento netto, come criterio di progetto che, introducendo strutture di protezione contro i previsti colpi di frusta delle tubazioni rotte, ne impediva, di fatto, la corretta e puntigliosa ispezione. Le prove sperimentali, condotte su oltre 100 tubazioni criccate e non da 4", 6" ed 8" di vario spessore, furono eseguite presso i laboratori del CISE di Milano, sotto la conduzione dell'ing. A. Squilloni. Responsabile dell'intero progetto era l'ing. Milella. Le analisi teoriche furono svolte presso il CISE e presso l'ENEA/DISP. Le prove sperimentali erano condotte su spezzoni di tubo di oltre 2 m di lunghezza sottoponendo la sezione criccata a momento puro mediante flessione su 4 punti operata da una macchina di carico da 1 MN (100 tn) secondo lo schema riportato in figura 1. In particolare, la presente memoria esamina il criterio dell'EPRI GE-Engineering approach (EPRI-GE) e ne confronta le previsioni, ottenute, in collaborazione tra l'ANPA e l'Università di Cassino, su tubazioni da 4" ed 11 mm di spessore contenenti cricche passanti da 90, 135 e 180°, con quelle provenienti da un accurato calcolo tridimensionale agli elementi finiti (FEM).

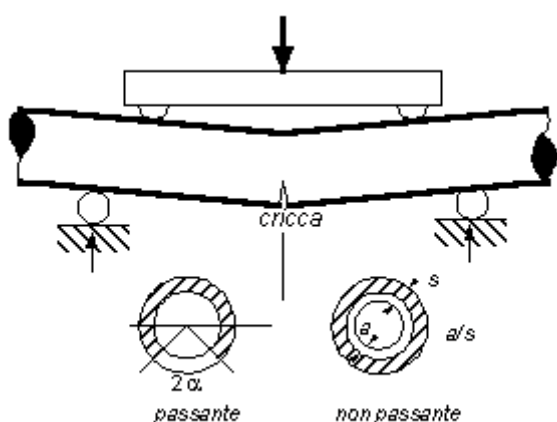


Fig. 1 - Disegno schematico del sistema di flessione su quattro punti dei tubi contenenti una cricca circonferenziale passante di estensione angolare 2α o continua (non passante) di profondità a/s .

La cricca passante era realizzata in due fasi. Nella prima, la tubazione veniva tagliata localmente introducendo una fessura circonferenziale di circa 3 mm di apertura. Nella seconda, si affilavano gli apici della fessura praticando, con un sistema di elettroerosione, degli intagli sottilissimi di 0.1 mm di ampiezza e circa 1 cm di lunghezza.

2. GE -EPRI Engineering Approach

Uno degli obiettivi del programma, descritto in una precedente memoria [1], era quello di verificare, a fronte delle evidenze sperimentali, la validità del criterio cosiddetto del *Net Section Collapse Load* (NSCL) o del carico di collasso della sezione netta. Ciò in quanto il criterio si presenta estremamente semplice ed immediato per una valutazione dell'integrità di una tubazione, anche criccata, e, dunque, idoneo più di altri ad essere inserito in una normativa o in criteri di progetto. Proprio l'intenzione di derivarne un criterio di progetto ha consigliato la ripetizione delle prove relative ad una stessa tipologia di tubazione (stesso diametro, spessore, lunghezza o profondità di cricca, etc.). A dispetto della grande variabilità dei parametri meccanici tradizionali, come la tensione di snervamento σ_s ed ancor più di meccanica della frattura, come il K_{Ic} , riscontrata tra lotto e lotto di una stessa fornitura ed addirittura sulla stessa tubazione tra punti diversi di prelievo, i risultati sperimentali ottenuti su tubazioni diverse, ma della stessa tipologia hanno rivelato una sorprendente riproducibilità spinta al punto stesso della sovrapposizione dei dati sperimentali. La presente memoria, si concentra sul secondo obiettivo del programma che era quello di verificare l'applicabilità del criterio EPRI-GE engineering approach, attraverso la formulazione approssimata del J data da Zahoor [2] basata sull'assunzione che l'intera sezione contenente la cricca abbia ceduto plasticamente. L'integrale J viene così approssimato con la seguente soluzione:

$$J = \frac{f_b \cdot M^2}{R^3 t^2 E + \alpha \sigma_0 \epsilon_0 \pi R (1 - \theta/\pi)^2 \cdot H_1 (M/M_0)^{n+1}} \quad (1)$$

in cui M è il momento applicato, R il raggio medio della tubazione, t lo spessore e θ il semiangolo di

apertura della cricca. Il termine M_0 rappresenta il momento limite ottenuto attraverso il criterio del *NSCL* ed le costanti α , σ_0 , ε_0 ed n sono quelli che compaiono nella formulazione secondo Ramberg-Osgood della relazione tensione-deformazione del materiale in esame:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2)$$

con $\varepsilon/\varepsilon_0 = E$, modulo di Young. Nella (1) il termine f_b dipende dal coefficiente d'incrudimento n e dal momento limite dato dal *NSCL* ed H_1 dal rapporto R/t , θ ed n . È chiaro che una siffatta formulazione, basata, come si è detto, sull'ipotesi di cedimento plastico della sezione contenente la cricca, può applicarsi a tubazioni fatte di materiali estremamente duttili, come l'acciaio inossidabile austenitico, ma può rivelarsi impropria per l'acciaio al carbonio. Di qui la necessità d'investigarne l'accuratezza a fronte dei risultati sperimentali ottenuti su tubazioni di A 106 B e dell'analisi accurata agli elementi finiti.

3. Modellazione agli Elementi Finiti

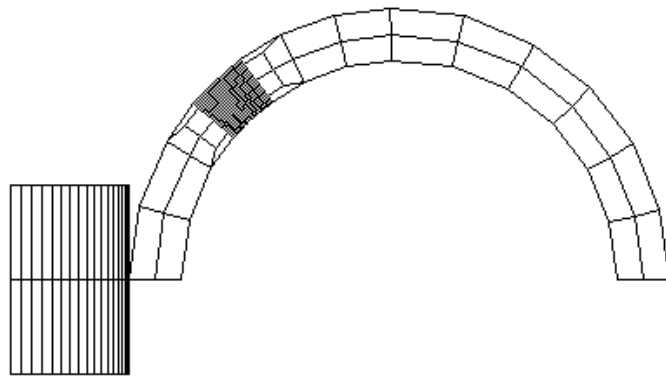
Sulla base della sperimentazione condotta dall'ENEA/DISP, sono state prese in esame geometrie di tubazione diverse per estensione della cricca passante, spessore e diametro, sollecitate a flessione su quattro punti, figura 1. Ogni geometria è stata schematizzata agli elementi finiti simulando un quarto della struttura, per ragioni di simmetria. Sono stati utilizzati elementi bi-lineari ad 8 nodi con tre gradi di libertà per ogni nodo. Il comportamento elasto-plastico del materiale è stato riprodotto assegnando la legge di incrudimento del materiale in un'approssimazione alla Ramberg-Osgood secondo la stessa legge (2) e con gli stessi valori dei parametri usati per il calcolo dell'integrale J col metodo EPRI-GE. Il calcolo è stato effettuato impiegando una formulazione di plasticità finita in grandi deformazioni e con *update* Lagrangiano.

La condizione di appoggio è stata riprodotta attraverso l'impiego di una superficie rigida simulante il supporto cilindrico utilizzato nelle prove. Questo tipo di soluzione, anche se rende il calcolo ancora più oneroso per via del problema del contatto, è tuttavia da preferire all'impiego di un carrello semplice in quanto, in presenza di grandi spostamenti, e quindi di significative rotazioni della tubazione, previene il formarsi di una estesa zona plastica che non trova corrispondenza nella realtà.



tubo90 spostamento imposto e=190gpa

1



tubo90 spostamento imposto e=190gpa

3

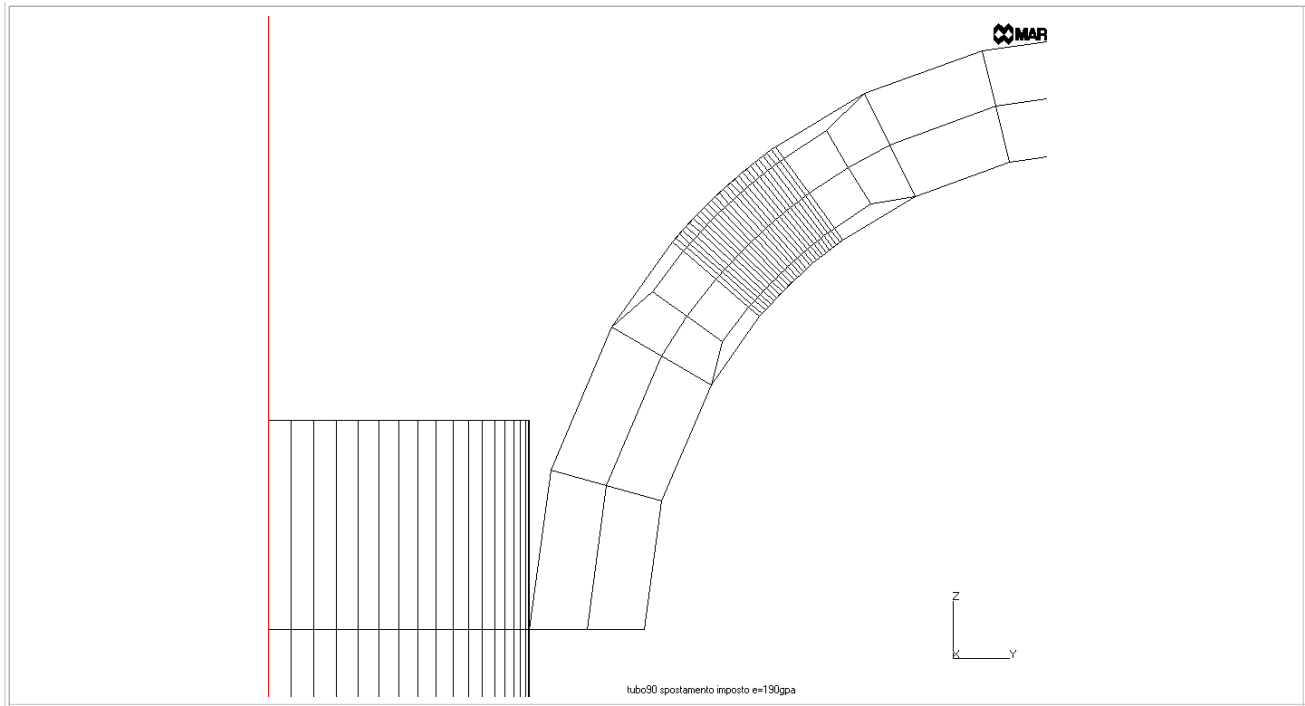


Fig. 2 – Schema del modello e dell'infittimento della zona d'apice

In figura 2, viene riportato un esempio del modello insieme a delle viste particolareggiate delle regioni a mesh infittita. Si vede come la realizzazione del modello sia stata particolarmente curata nella zona circostante l'apice della cricca al fine di avere un'accurata descrizione del campo di sollecitazione. Tuttavia, essendo interessati alla soluzione plastica, ed in particolare all'evoluzione della zona plastica fino al raggiungimento delle condizioni di collasso della struttura, si è mantenuta una discretizzazione regolare della regione di fondo intaglio senza ricorrere ad elementi fortemente distorti o alla tecnica del *quarter point*. Gli elementi di fondo intaglio hanno una dimensione minima di circa 0.45 mm. Lo stesso grado di discretizzazione è stato mantenuto sia sullo spessore che circonferenzialmente ed in direzione assiale, in modo da circoscrivere il volume intorno all'apice del difetto. Al fine di limitare il numero di elementi del modello, per ridurre i tempi di elaborazione, si è proceduto ad un'operazione di *enlargment* tridimensionale della maglia secondo lo schema riportato in figura 3. I calcoli sono stati eseguiti in condizioni di spostamento imposto. Per ogni configurazione di cricca esaminata, è stato calcolato il valore di J per ogni passo di carico utilizzando il metodo di Parks o dell'avanzamento virtuale del difetto. L'indipendenza dal percorso scelto dal valore trovato è stata verificata confrontando tra loro i valori di J relativi a tre percorsi tridimensionali centrati intorno al fronte del difetto.

La verifica del modello è stata effettuata confrontando innanzitutto la risposta globale della struttura, in termini di carico applicato in funzione dell'abbassamento della tubazione, con i diagrammi sperimentali. I risultati sono mostrati nelle figure 4, 5 relative a tubazioni di 4" con spessore di 11 mm, contenenti cricche passanti di 90 e 135° di estensione. Per tutte le configurazioni studiate si è osservato una sovrastima del carico applicato, a parità di spostamento imposto, dell'ordine del 15%. Questa differenza si deve attribuire principalmente, se non esclusivamente, all'assestamento iniziale dei giochi nella prima fase di applicazione del carico, ben visibile nella parte iniziale delle curve sperimentali carico-spostamento che partono con una pendenza via via crescente sino a qualche millimetro, dopo di che si stabilizzano sino al raggiungimento dello scorrimento plastico. Si può vedere come l'accordo FEM-dati sperimentali sia particolarmente accurato sino a tale ultima fase in quanto, nei casi esaminati, essa avviava anche il processo di crescita sottocritica della cricca abbassando, di fatto, la rigidità della tubazione rispetto a quella teorica dei FEM. Un secondo confronto con i dati sperimentali è stato quello del COD, in funzione dell'abbassamento della struttura, riportato in figura 6, 7 ed 8.

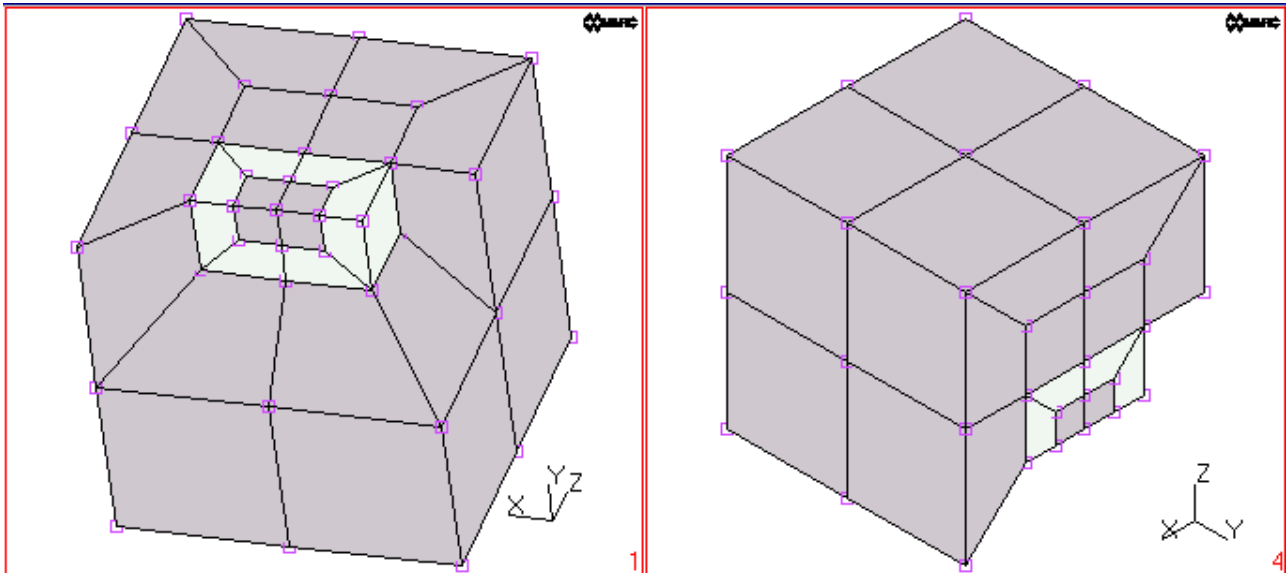


Fig. 3 – Schema tridimensionale di riduzione della maglia.

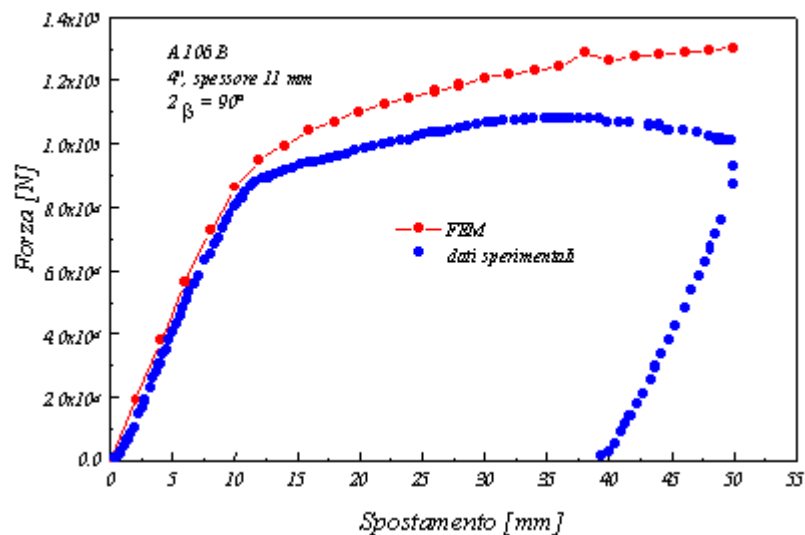


Fig. 4 - Andamento sperimentale e numerico (FEM) forza-spostamento per una tubazione di 4" ed 11 millimetri di spessore contenente una cricca passante di 90°.

Anche in questo caso l'accordo tra calcolo numerico e dati sperimentali differisce oltre i 10 mm, circa, di spostamento, in maniera significativa per i tubi con cricca da 90°, per le ragioni sopra dette. Una conferma di ciò ci viene data dalle registrazioni del *potential drop* che individuano proprio il momento in cui l'apice della cricca comincia a lacerarsi in maniera sottocritica.

4. Confronto FEM-GE-EPRI. Conclusioni

L'ultima fase dello studio è rappresentata dal confronto tra il *J-integral* ed il COD calcolati numericamente e quelli ottenuti con il metodo approssimato EPRI-GE. Per il COD, in particolare, il confronto è esteso ai dati di derivazione sperimentale. I risultati sono mostrati nelle figure 9, 10, 11 e 12 per i tubi contenenti cricche da 90 e 135°. Si può ben vedere come i *J-integral* teorici ottenuti col metodo EPRI-GE siano distanti da quelli FEM a partire da valori della forza applicata ancora in campo lineare elastico (v. fig 4 e 5).

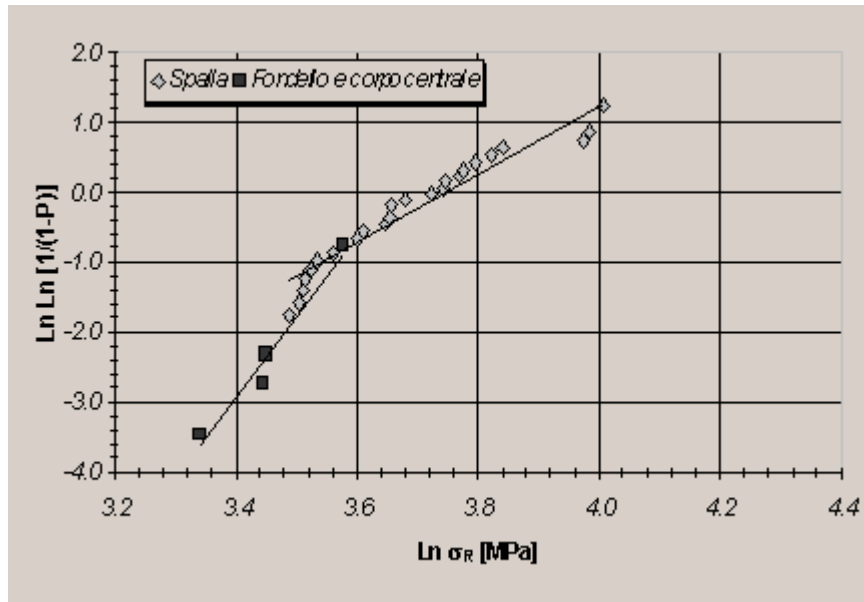


Fig. 5 - Andamento sperimentale e numerico (FEM) forza-spostamento per una tubazione di 4" ed 11 millimetri di spessore contenente una cricca passante di 135°.

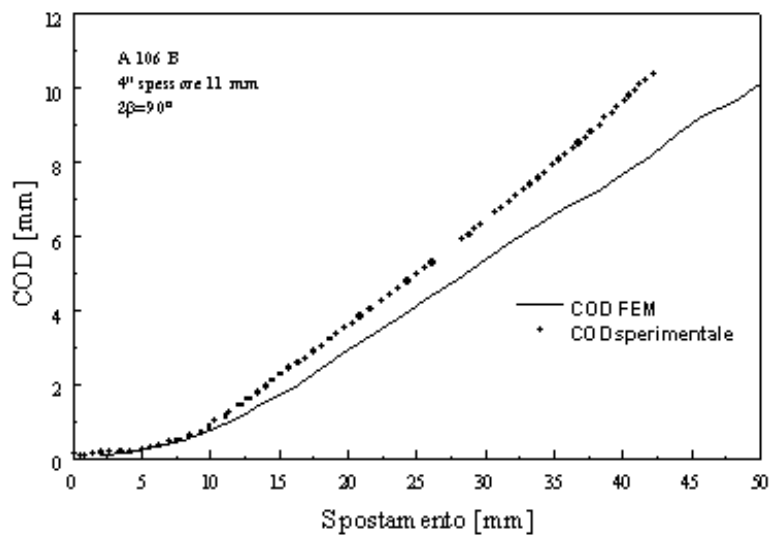


Fig. 6 - Andamento del COD sperimentale e numerico (FEM) per una tubazione di 4" ed 11 millimetri di spessore contenente una cricca circonferenziale passante di 90°.

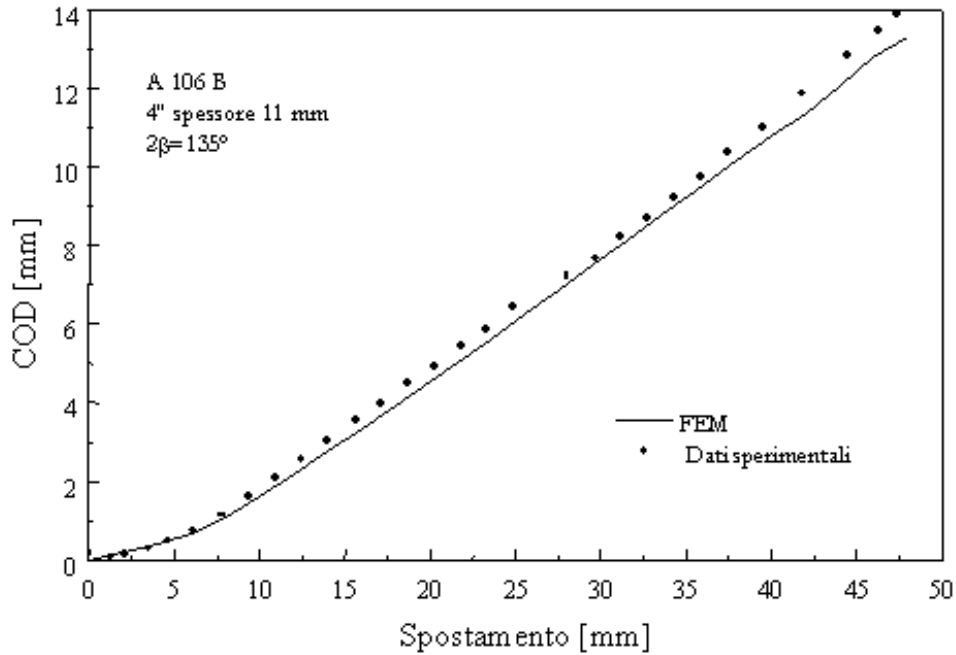


Fig. 7 - Andamento del COD sperimentale e numerico (FEM) per una tubazione di 4" ed 11 millimetri di spessore contenente una cricca circonferenziale passante di 135° .

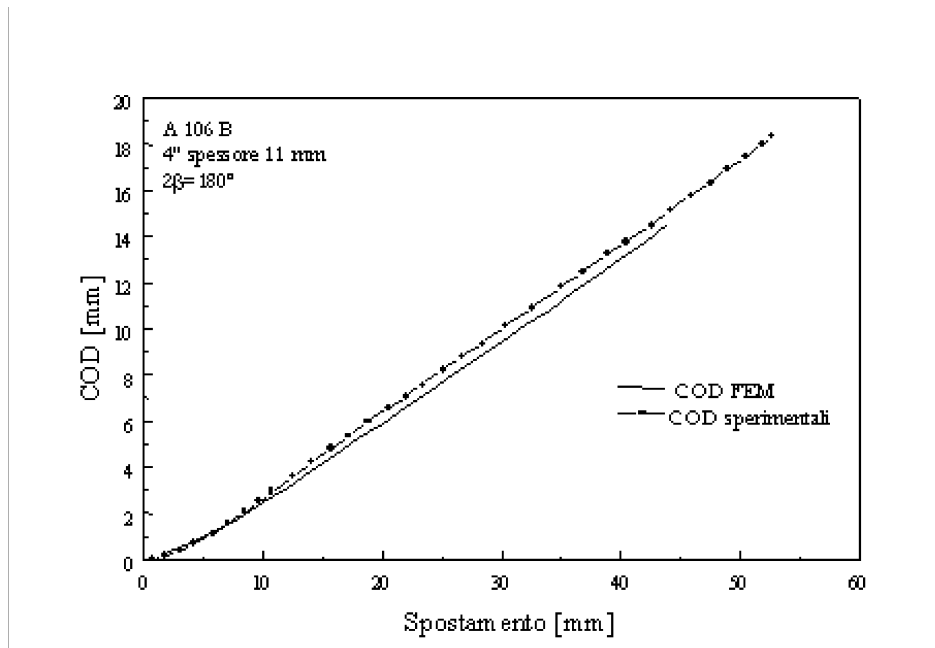


Fig. 8 - Andamento del COD sperimentale e numerico (FEM) per una tubazione di 4" ed 11 millimetri di spessore contenente una cricca circonferenziale passante di 180° .

Ciò è particolarmente avvertito nella tubazione contenente la cricca da 135° in cui si rileva una totale difformità tra i due J . Passando ai relativi COD, invece, l'accordo si presenta interessante sino all'insorgere della prima lacerazione stabile. Di qui in poi si differenziano ed entrambi divergono rispetto a quanto misurato sperimentalmente, sempre per il verificarsi della lacerazione stabile.

Lo studio mostra chiaramente come l'approccio EPRI-GE non sia affatto affidabile, e fin troppo conservativo, nell'individuazione del J applicato alle tubazioni di A 106 B contenenti cricche passanti. Ciò era, in un certo senso, atteso in quanto, come si è detto, esso si basa sull'assunzione di completa

plasticizzazione della sezione contenente la cricca che, in un acciaio al carbonio può non essere vero, almeno prima del carico massimo applicato.

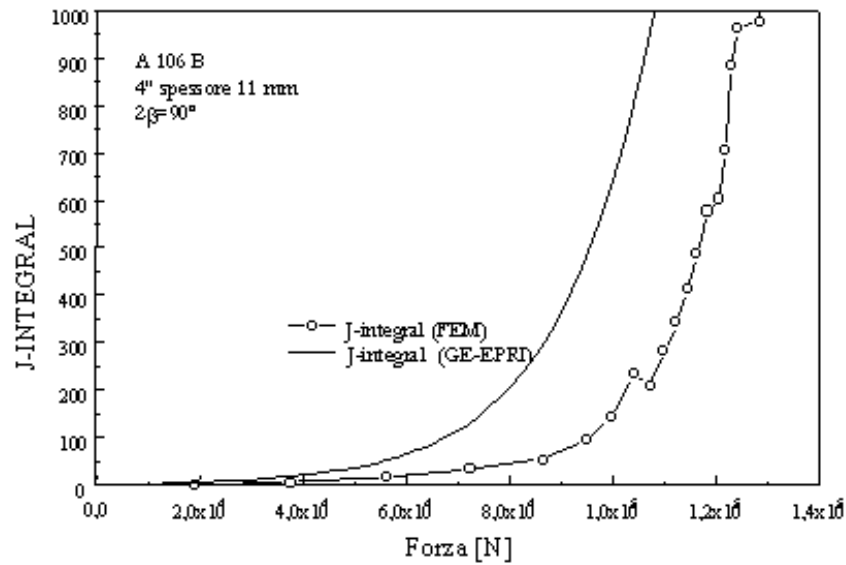


Fig. 9 - Confronto tra il J-integral ottenuto numericamente e quello teorico EPRI-GE per una tubazione contenente una cricca circonferenziale di 90°.

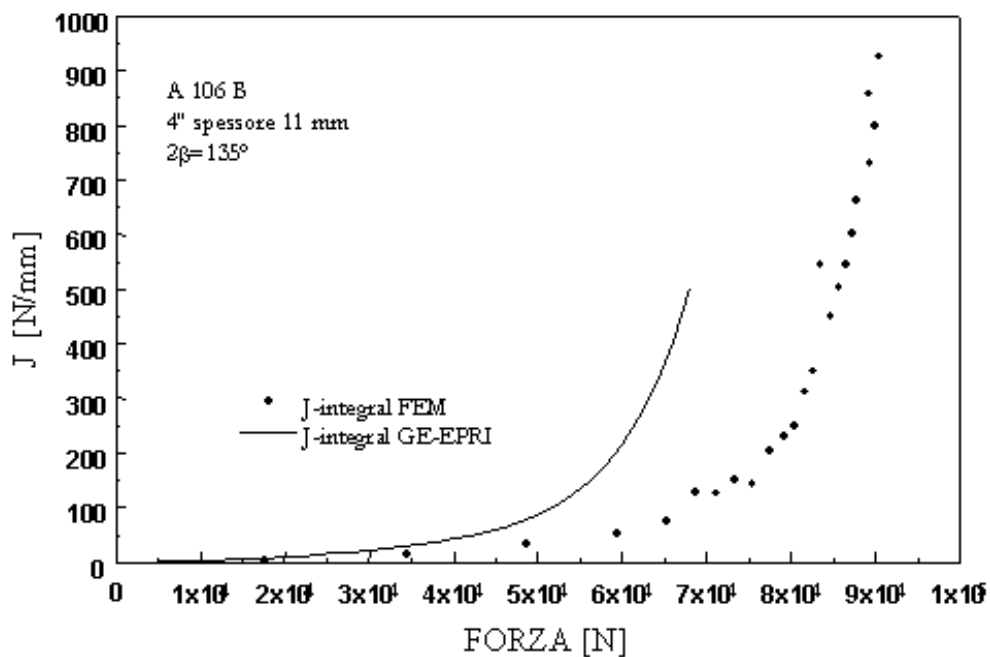


Fig. 10 - Confronto tra il J-integral ottenuto numericamente e quello teorico EPRI-GE per una tubazione contenente una cricca circonferenziale di 135°.

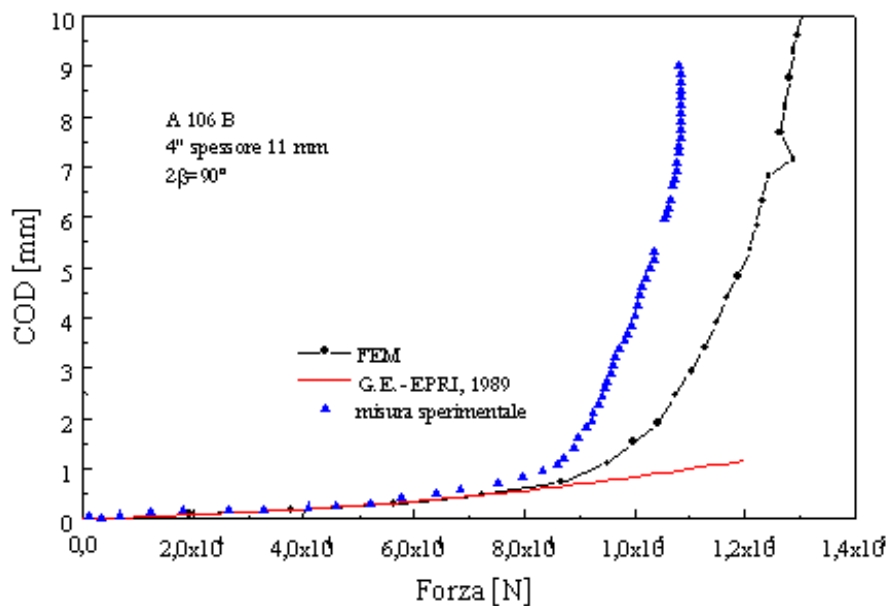


Fig. 11 - Confronto tra il COD ottenuto numericamente e quello teorico EPRI-GE per una tubazione contenente una cricca circonferenziale di 90°. Pure mostrato è il COD sperimentale.

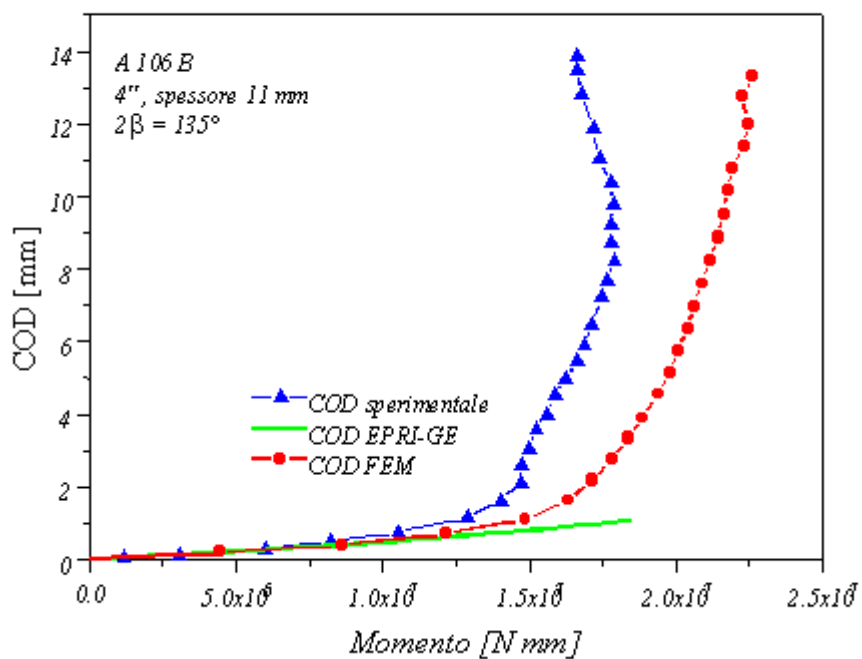


Fig. 12 - Confronto tra il COD ottenuto numericamente e quello teorico EPRI-GE per una tubazione contenente una cricca circonferenziale di 135°. Pure mostrato è il COD sperimentale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Milella, P.P., *Atti del XIII Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura*, pp. 449-457, Ductile Fracture Handbook, Vol.1 EPRI NP-6301-D, N14-1 June 1989

Atti del convegno

[[Precedente](#)] [[Successiva](#)]

Versione HTML realizzata da

