

**IGF 11 - XI Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Brescia, 4-6 luglio 1995**

**UN NUOVO METODO SEMPLIFICATO PER DETERMINARE LA CURVA J-R
DA CARICO E SPOSTAMENTO REGISTRATI IN UNA PROVA
SU UN SINGOLO CAMPIONE**

R. Roberti*, Sh. Basha**

* Dipartimento di Ingegneria dei Materiali, Università degli Studi di Trento

** Dottorando in Ingegneria dei Materiali, Politecnico di Milano

Introduzione

La resistenza di un materiale alla propagazione della frattura viene usualmente caratterizzata facendo ricorso a prove standardizzate [1-3] e viene descritta da curve nelle quali l'incremento delle dimensioni di una cricca è posto in relazione all'incremento del valore di un parametro di carico, l'integrale J o lo spostamento all'apice della cricca (CTOD). Nel caso dell'integrale J, la curva di resistenza alla propagazione della frattura è detta curva J-R e per la sua determinazione, nel corso di una prova su un campione precriccato, è necessario misurare tre parametri, il carico P, lo spostamento del punto di applicazione del carico v_{LL} , e l'incremento delle dimensioni della cricca Δa . Mentre carico e spostamento del punto di applicazione del carico sono registrati in continuo nel corso della prova mediante la strumentazione di cui sono normalmente dotate le macchine di prova, per la determinazione della lunghezza della cricca si può, in alternativa, misurarne le dimensioni direttamente sulle superfici di frattura, dopo aver separato in due metà il campione al termine della prova, oppure indirettamente facendo ricorso alle tecniche della caduta di potenziale [3,4] o della variazione della cedevolezza elastica [2,3,5].

Il primo dei metodi per la misura di Δa consente di ottenere il solo valore finale, raggiunto immediatamente prima della fase di scarico del campione, come differenza fra le dimensioni finale a_f ed iniziale a_0 della cricca, e conseguentemente per la determinazione della curva J-R diventa necessario sottoporre a prova un elevato numero di campioni fra loro uguali, portando ognuno di essi ad un differente livello di carico così da ottenere diverse coppie di valori J- Δa . In tal caso è pertanto necessario disporre di sufficiente materiale per la fabbricazione dei campioni ed allo

stesso tempo la misura di una curva J-R risulta inevitabilmente onerosa; va anche segnalato, tuttavia, che questa procedura, comunemente indicata come metodo multicampione, è ritenuta la più precisa ed è indicata dagli standard di prova come quella da impiegare per la calibrazione dei metodi monocampione.

Le metodologie della misura della caduta di potenziale elettrico a cavallo della cricca o della variazione di cedevolezza elastica, consentendo di ricavare indirettamente la dimensione della cricca in modo più o meno continuo nel corso della prova, permettono di determinare la curva J-R sottoponendo a prova un singolo campione; per questi metodi monocampione è tuttavia indispensabile disporre di strumentazioni aggiuntive sofisticate per una accurata registrazione dei parametri richiesti.

Come si comprende dalle ricerche sia teoriche che sperimentali condotte al riguardo [6-15], è particolarmente sentita l'esigenza di mettere a punto un metodo di prova monocampione che possa minimizzare i costi e che semplifichi le procedure di esecuzione; ciò consentirebbe anche, ad esempio, di recuperare i risultati di prove nelle quali si sono avuti errori o interruzioni nella registrazione del potenziale o della cedevolezza, o di evitare di dover ricorrere all'impiego di strumentazioni delicate in condizioni gravose, quali quelle delle prove ad alta temperatura o in ambienti aggressivi, oppure ancora di estendere la metodologia monocampione ai materiali non conduttori ed a comportamento viscoelastico per i quali i metodi della caduta di potenziale e della variazione di cedevolezza non sono applicabili.

La maggior parte dei metodi semplificati proposti in letteratura sono una estensione della analisi delle curve carico-spostamento registrate nel corso delle prove con il metodo della "key curve" [16] e si basano sul principio della separazione del carico [17-18] secondo il quale il carico P può essere separato nel prodotto di due contributi, il primo dei quali funzione della lunghezza della cricca a , ed il secondo funzione dello spostamento plastico v_p , $P = G(a/W)H(v_p/W)$, nella quale W è l'altezza del campione.

Un ulteriore metodo semplificato per calcolare la lunghezza istantanea della cricca disponendo della sola registrazione del carico e dello spostamento di una singola prova unitamente alla dimensione iniziale e finale della cricca e per derivare conseguentemente la curva J-R del materiale in esame viene proposto in questa memoria e ne viene presentata l'applicazione a differenti geometrie di prova su campioni fabbricati di diversi tipi di acciaio.

Il nuovo metodo semplificato

Dall'analisi di Ernst e coll. [16] la relazione fra carico e spostamento del punto di applicazione del carico, nel caso di geometrie semplici per le quali la plasticizzazione del materiale è confinata nel legamento all'apice della cricca, risulta poter essere scritta nella seguente forma,

$$\frac{PW}{Bb^2} = F_1(v_{LL}/W, a/W, \dots) \quad //$$

nella quale b è la dimensione del legamento ed F_1 , la "key curve", è una funzione che pone in relazione il carico e lo spostamento normalizzati e la lunghezza della cricca, e che dipende dalla geometria del campione e dalle proprietà del materiale.

Per una data geometria la "key curve" è semplicemente rappresentata dal diagramma di prova con il carico e lo spostamento normalizzati fino al punto di innesco della propagazione della cricca. Dopo l'innesco la curva carico-spostamento normalizzati si scosta dalla "key curve" che si otterrebbe nel caso di cricca stazionaria, ed è possibile supporre che la differenza fra le due curve sia utilizzabile per calcolare in ogni istante dalla prova le dimensioni della cricca.

Per ogni prova su un singolo campione, dalla dimensione finale della cricca si può calcolare il carico finale normalizzato $P_{Nf} = P_f W / B b_f^2$, mentre con la lunghezza iniziale della cricca la stessa equazione potrebbe consentire di calcolare il carico normalizzato per cricca stazionaria $P_{Ncsf} = P_{csf} W / B b_o^2$, nel caso fosse noto il carico finale P_{csf} che si sarebbe registrato nel caso non fosse avvenuto l'avanzamento della cricca. Dall'uguaglianza del carico normalizzato sperimentale e quello per cricca stazionaria si può ottenere l'equazione che correla il carico finale registrato nel corso della prova con quello che si sarebbe registrato nel caso di cricca stazionaria,

$$P_{csf} = P_f b_o^2 / b_f^2 \quad /2/$$

Nel caso la curva $P_{cs}-v_{LL}$ risulti nota per tutta la prova, diviene possibile calcolare la dimensione del legamento istantaneo b_i (e quindi la corrispondente lunghezza della cricca a_i) per ogni istante della prova stessa dalla equazione,

$$b_i = b_o \sqrt{(P_i / P_{cs})} \quad /3/$$

Numerose verifiche eseguite utilizzando i dati sperimentali di prove multicampione hanno consentito di osservare che la curva $P_{cs}-v_{LL}$ è sempre ben approssimata da una retta tangente alla curva $P-v_{LL}$ sperimentale. In conseguenza di ciò il metodo semplificato che viene proposto per la determinazione della curva J-R a partire dal solo diagramma $P-v_{LL}$ e dalla lunghezza iniziale e finale della cricca può essere semplicemente riassunto come segue (fig. 1):

- a) ottenuta la registrazione della curva $P-v_{LL}$ sottoponendo a prova un singolo campione e misurata la lunghezza iniziale e finale della cricca dall'equazione /2/ si calcola il valore del carico P_{csf} (fig. 1a);
- b) dal punto P_{csf} si traccia la tangente alla curva $P-v_{LL}$ (fig. 1b);
- c) per tutti i punti compresi fra il punto di tangenza e quello finale della prova si determina la lunghezza istantanea della cricca ricorrendo all'equazione /3/ (fig. 1c), procedendo poi come indicato negli standard per il calcolo dell'integrale J applicato in corrispondenza di ogni valore di a_i ottenuto.

Parte sperimentale

Per la verifica sperimentale del metodo semplificato proposto per la determinazione della curva J-R a partire dal solo diagramma carico-spostamento e dalla lunghezza iniziale e finale della cricca si sono in primo luogo utilizzati i risultati di prove pubblicati in letteratura laddove erano resi disponibili i dati necessari per il calcolo della lunghezza istantanea della cricca così come specificato nel paragrafo precedente. In particolare tale verifica è stata condotta rielaborando i dati pubblicati relativamente a prove su campioni CT di differente spessore, in acciaio SA533B Classe I, e messi a disposizione nell'ambito di un Round Robin proposto in ambito EGF (ora ESIS) [19], ed a prove di flessione su tubi criccati circonferenzialmente su tutto lo spessore in acciaio inossidabile austenitico 304 [20].

Per completare la verifica con altre geometrie e tipi di acciaio si sono inoltre condotte prove multicampione utilizzando:

a) campioni di flessione su tre punti (campioni SENB) in acciaio da costruzione ad alto limite di snervamento (Nicuage);

b) campioni con intaglio laterale di spessore sottile ed assoggettati a trazione (campioni SENT), in acciaio inossidabile austenitico AISI 304;

Infine, si è eseguita anche una prima verifica dell'applicabilità del metodo proposto relativamente alla determinazione della lunghezza della cricca istantanea nel corso di una prova di crescita di cricca sotto carico costante a temperatura ambiente in un provino di flessione su tre punti, fabbricato in acciaio X65, per il quale la misura della cricca istantanea è stata ottenuta dalla misura della caduta di potenziale.

Risultati sperimentali e discussione

Nella fig. 2 sono riportate le curva J-R ottenute con il metodo multicampione per i provini CT di spessore 10 (fig. 1a) e 100 mm (fig. 1b), unitamente alle curve J-R calcolate con il metodo proposto a partire dalla singola curva di prova carico-spostamento di uno solo dei campioni per ognuno dei due spessori; in entrambi i casi lo scostamento fra le due curve J-R ottenute è alquanto ridotto, ed in particolare, dai risultati ottenuti per i provini CT10 è anche possibile osservare come, pur avendo utilizzato per il metodo monocampione proposto un provino a basso valore di avanzamento della cricca, la curva J-R estrapolata a più alti valori di Δa sia risultata comunque particolarmente accurata nel descrivere i dati sperimentali della procedura multicampione.

Le stesse osservazioni si possono fare con riferimento alla fig. 3 dove sono presentate a confronto le curve J-R multicampione e da singolo provino con il metodo proposto; in questo caso il provino impiegato per la verifica del metodo monocampione è quello a più alto valore di Δa durante la prova.

Numerose altre verifiche sono state effettuate su diversi tipi di acciai relativamente a prove con le geometrie di campione CT e SENB più frequentemente impiegate nella caratterizzazione a frattura dei materiali; per brevità non sono state introdotte nel

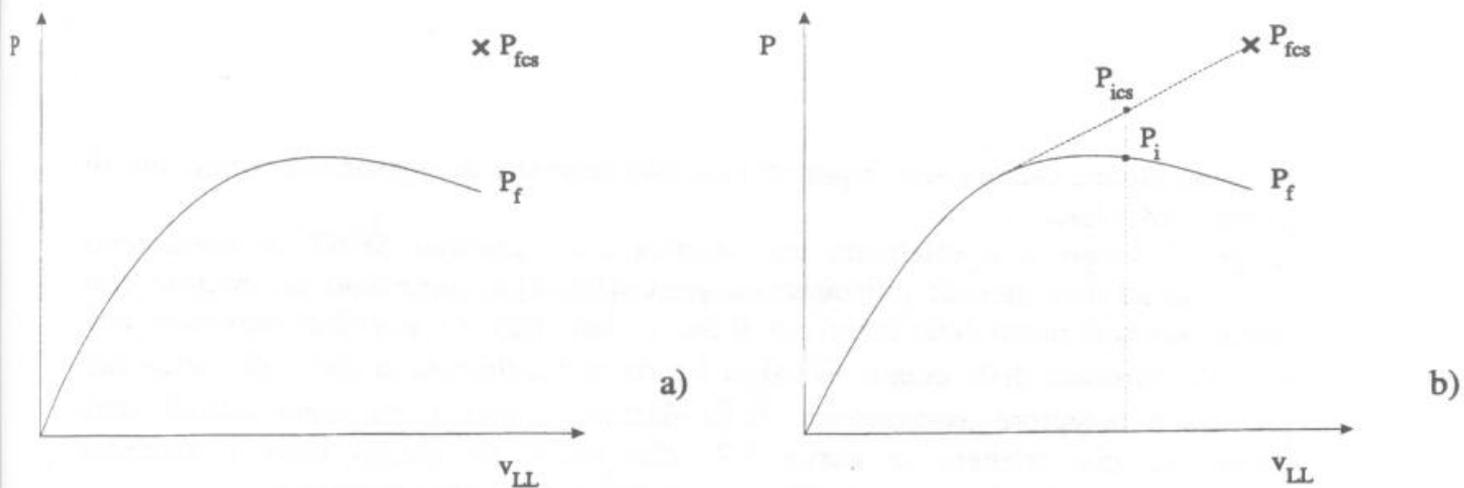


Fig. 1 - Schema di applicazione del metodo monocampione proposto per il calcolo della curva J-R

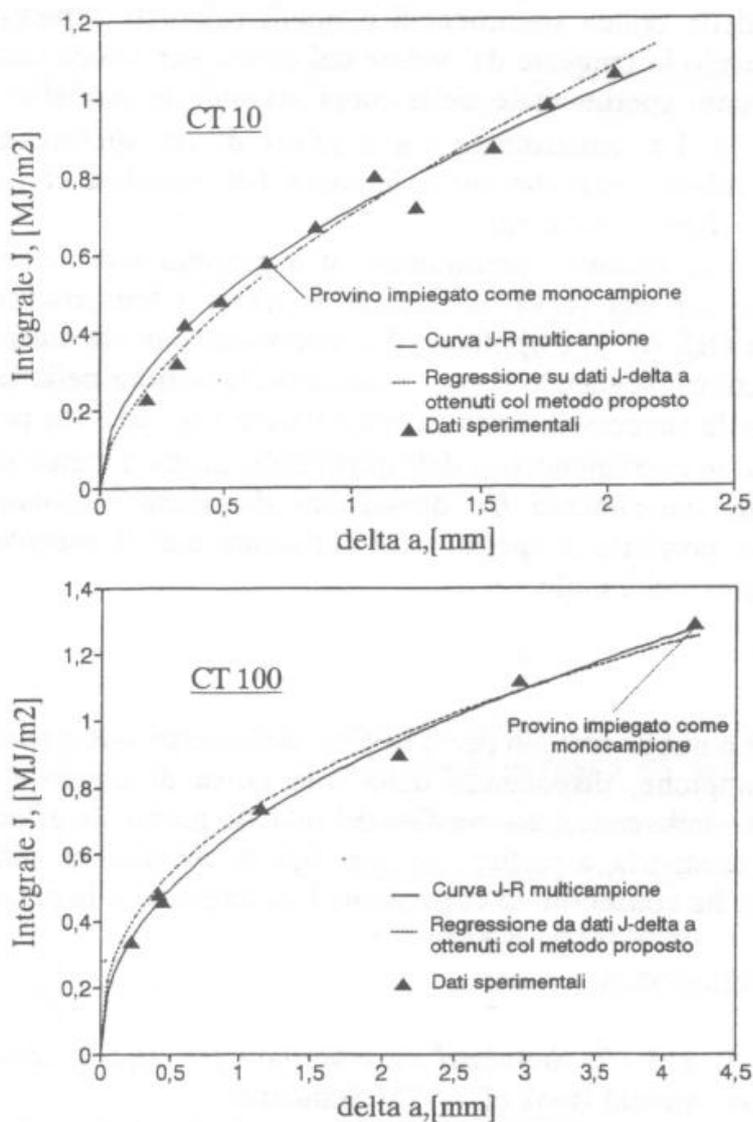


Fig. 2 - Curve J-R multicampione e da campione singolo con il metodo monocampione proposto, per provini CT [19]

presente lavoro, mentre sono riportati i risultati relativi a geometrie o a condizioni di prova particolari.

In primo luogo si è effettuata una verifica con campioni SENT in condizioni prossime ad uno stato di sollecitazione piana (fig. 4) e contenenti un intaglio con raggio acuto al posto delle precricca di fatica; dalla figura è possibile osservare che per l'ottenimento delle coppie di valori J e Δa si è utilizzata la curva di carico del provino a maggiore avanzamento della frattura. I dati J , Δa sono quindi stati interpolati per ottenere la curva J - R , che anche in questo caso è risultata praticamente coincidente con quella derivata dal metodo multicampione.

Una ulteriore verifica ha riguardato prove su campioni costituiti da tubi, di spessore differente, criccati circonferenzialmente [20]. In questo caso il confronto per la verifica del metodo monocampione proposto viene effettuato riportando i valori di avanzamento della cricca sperimentali e quelli calcolati a partire dalla curva di carico e tracciando la tangente dal valore del carico per cricca stazionaria calcolato per l'ultimo punto sperimentale della curva secondo le modalità precedentemente indicate (fig. 5). Lo scostamento fra i valori di Δa sperimentali e calcolati è estremamente ridotto, così che anche le curve J - R calcolate con i due metodi non possono che risultare coincidenti.

Infine, a livello di tentativo preliminare, si è eseguita una verifica per il metodo proposto anche per una prova di crescita di cricca a temperatura ambiente, sotto carico costante (fig. 6). Si è applicato il metodo semplificato sia a partire dal valore iniziale delle cricca, seguendo l'avanzamento della frattura nella fase preliminare di carico e in quella successiva sotto carico costante (fig. 6a), sia partendo dal valore di Δa raggiunto in corrispondenza dell'inizio della prova a carico costante. Anche in questo caso lo scostamento fra dimensioni di cricca calcolate con il metodo monocampione proposto e sperimentali (misurate con il metodo della caduta di potenziale) è pressochè nullo.

Conclusioni

Si è proposto un nuovo metodo per il calcolo della curva J - R a partire dalla prova su un singolo campione, disponendo della sola curva di carico e delle dimensioni iniziale e finale della cricca. La verifica del metodo proposto, effettuata su campioni di differente geometria a partire da vari tipi di acciaio, in condizioni di carico diverse fra loro ha consentito di constatarne l'accuratezza e la generale applicabilità.

Riferimenti bibliografici

- 1 - ASTM E 813-87, *Standard Test Method for J_{IC} , a Measure of Fracture Toughness*. Annual Book of ASTM Standards.
- 2 - ASTM E 1152-87, *Standard Test Method for Determining J - R Curves*. Annual Book of ASTM Standards.
- 3 - ESIS P1-92D (1992), *ESIS Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials*. European Structural Integrity Society.

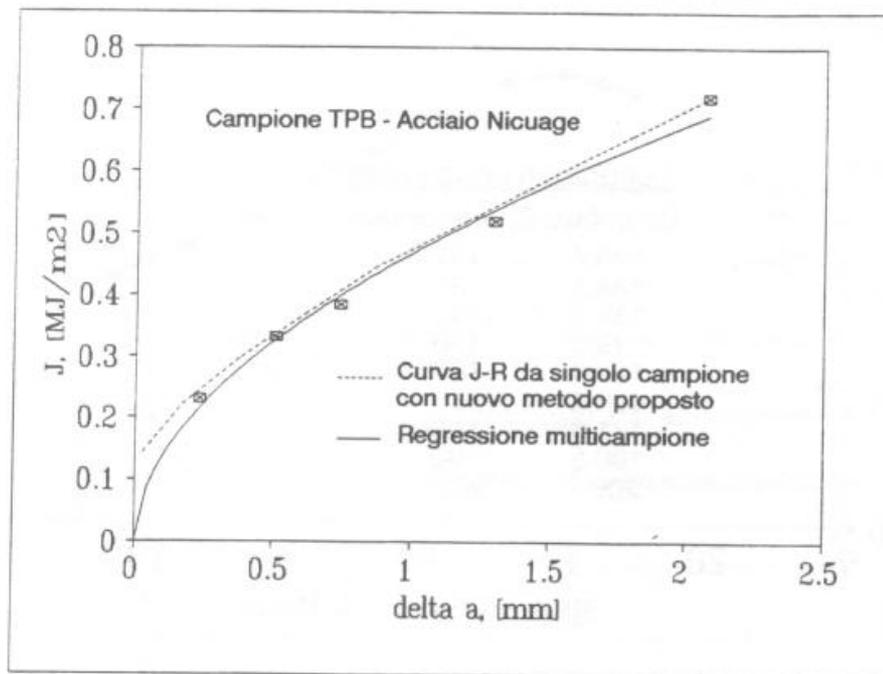


Fig. 3 - Confronto fra curve J-R da metodo multiprovino e metodo monocampione proposto nel caso di provini SENB

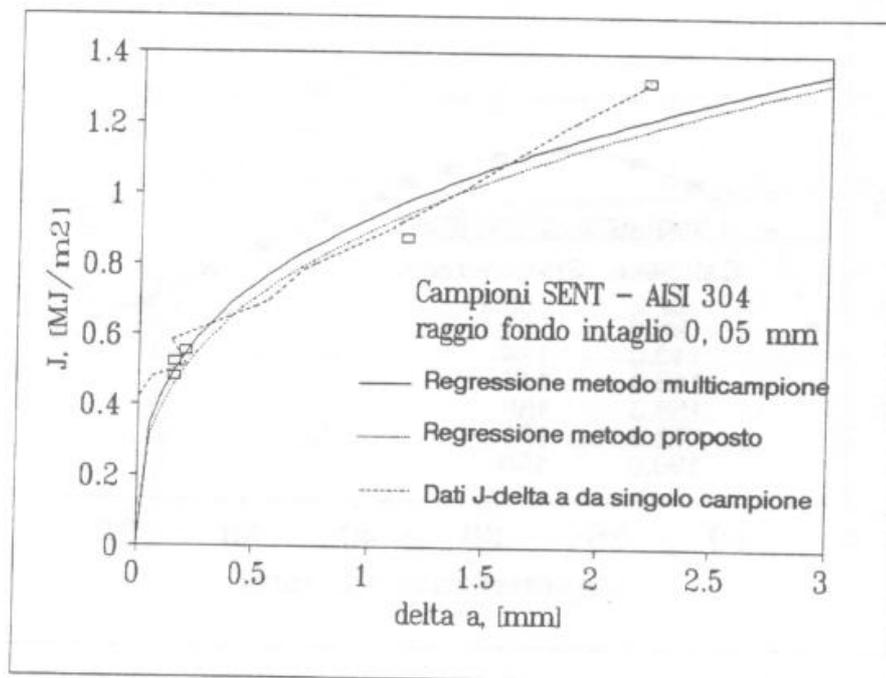


Fig. 4 - Confronto fra curve J-R da metodo multiprovino e metodo monocampione proposto nel caso di provini SENT in condizioni di sollecitazione piana

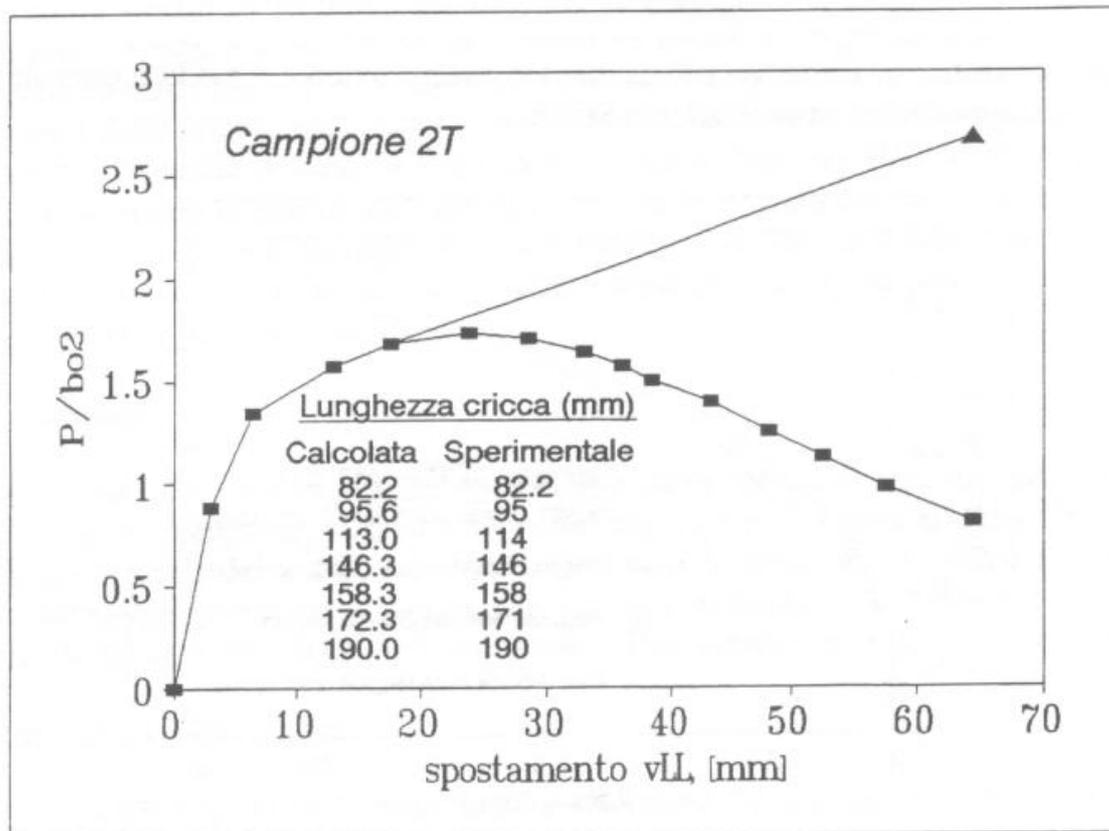
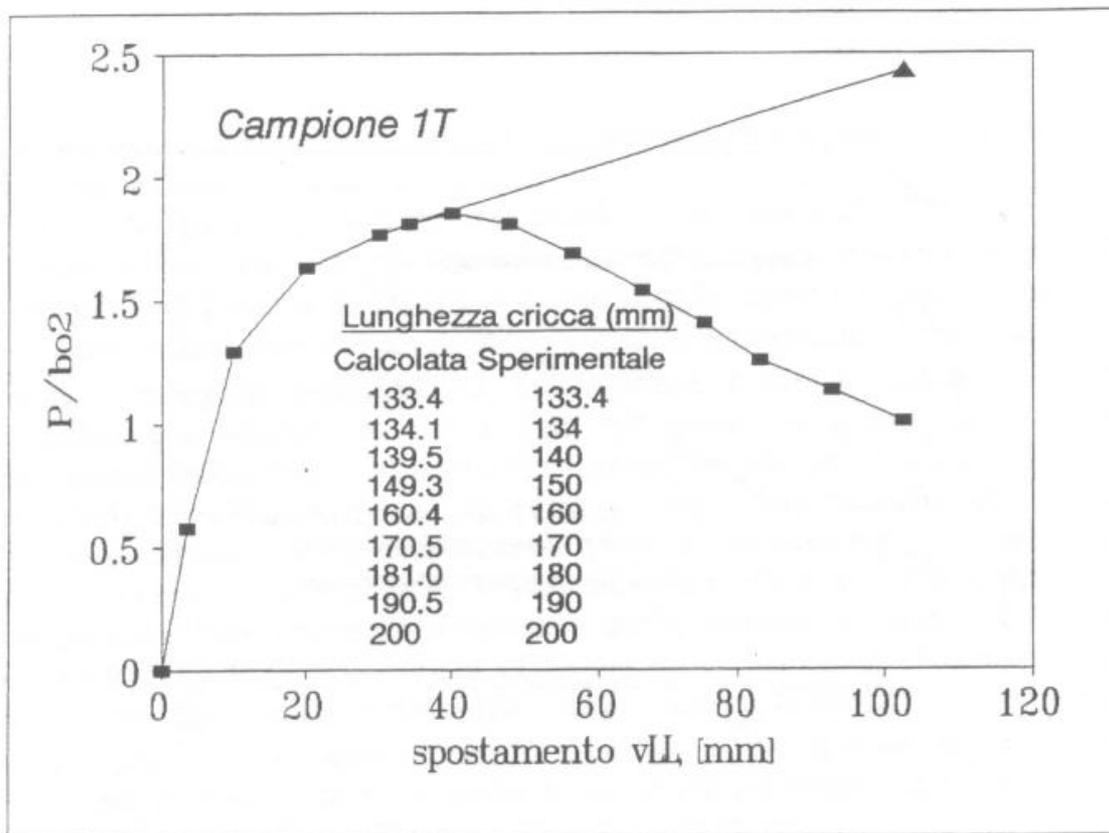


Fig. 5 - Confronto fra dimensioni delle cricca sperimentali e determinate con il metodo monocampione proposto per il calcolo della curva J-R nel caso di prove su tubi criccati circonferenzialmente sottoposti a flessione [20]

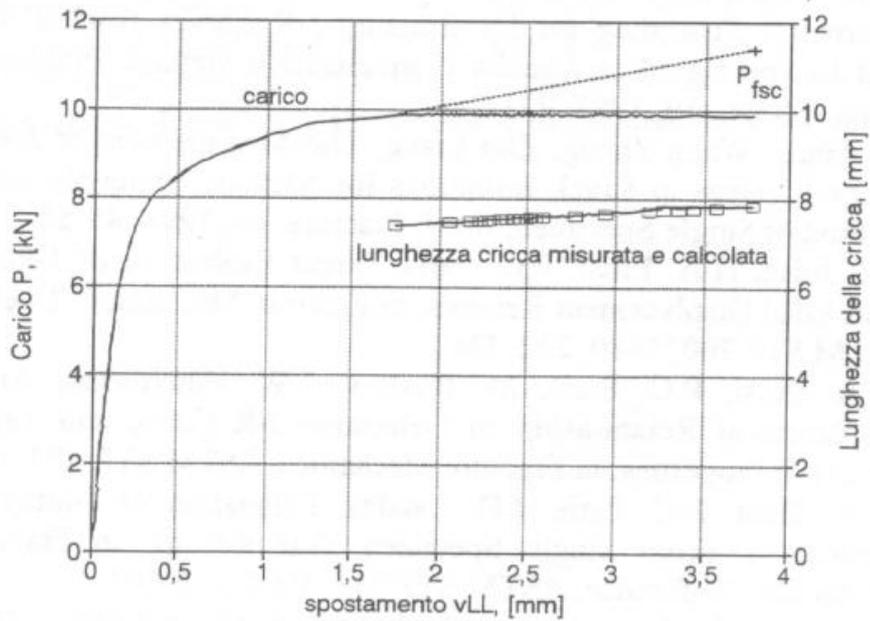
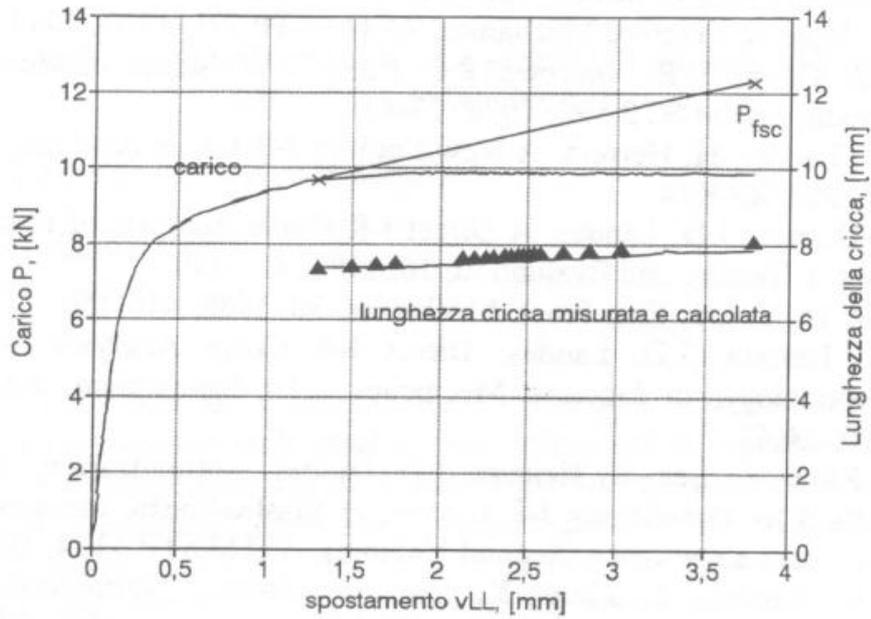


Fig. 6 - Confronto fra dimensioni delle cricca sperimentali e determinate con il metodo monocampione proposto per il calcolo della curva J-R nel caso di prove di avanzamento di frattura a temperatura ambiente sotto carico costante su campione SENB

- 4 - K.-H. Schwalbe, D. Hellmann, *Application of the Electrical Potential Method to Crack Length Measurements Using the Johnson's Formula*, J. Testing and Evaluation, 9, 1981, 218-221.
- 5 - A. Saxena, S.J. Hudak, *Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens*, Int. J. Fracture, 14, 1978, 453-468.
- 6 - J.A. Joice, in *Fracture Mechanics*, ASTM STP 791, 1983, 1543-1560.
- 7 - G.A. Clark, W.R. Andrews, P.C. Paris, D.W. Smith, in *Mechanics of Crack Growth*, ASTM STP 590, 1976, 27-42.
- 8 - J.D. Landes, H. Herrera, *A New Look at J-R Curve Analysis*, Int. J. Fracture, 36, 1988, R9-R14.
- 9 - H. Herrera, J.D. Landes, *A Direct J-R Curve Analysis of Fracture Toughness Tests*, J. Testing and Evaluation, 16, 1988, 427-449.
- 10 - X.W. Li, Y. Liu, *Eng. Fract. Mechanics*, 30, 1988, 445-450.
- 11 - H. Herrera, J.D. Landes, *Direct J-R Curve Analysis: A Guide to the Methodology*, in *Fracture Mechanics: 21st Symposium*, ASTM STP 1074, 1990, 24-43.
- 12 - Z. Zhou, K. Lee, H. Herrera, J.D. Landes, *Normalization: An Experimental Method for Developing J-R Curves*, in *Elastic-Plastic Fracture Test Methods; The User's Experience (Second Volume)*, ASTM STP 1114, 1991, 42-56.
- 13 - J.D. Landes, Z. Zhou, K. Lee, H. Herrera, *Normalization Method for Developing J-R Curves with the LMN Function*, J. Testing and Evaluation, 19, 1991, 305-311.
- 14 - E.D. Reese, K.-H. Schwalbe, *The Linear Normalization Technique - An Alternative Procedure for Determining J-R Curves from a Single Specimen Test Record Based on Landes' Normalization Method*, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 16, 1993, 271-280.
- 15 - Ma Hang, Wang Zheng, Zhu Liang, *The Measurement of J-R Curves and J-Integral Values at Crack Initiations for Metallic Materials with Three Curve Method of Single Specimen*, Int. J. Fracture, 68, 1994, 45-54.
- 16 - J.A. Joice, H.A. Ernst, P.C. Paris, *Direct Evaluation of J-Resistance Curves from Load Displacement Records*, in *Fracture Mechanics: Twelfth Conference*, ASTM STP 700, 1980, 222-236.
- 17 - H.A. Ernst, P.C. Paris, M. Rossow, J.W. Hutchinson, *Analysis of Load Displacement Relationship to Determine J-R Curve and Tearing Instability Materials Properties*, in *Fracture Mechanics*, ASTM STP 677, 1979, 581-599.
- 18 - H.A. Ernst, P.C. Paris, J.D. Landes, *Estimation of J-integral and Tearing Modulus T From Single Specimen Test Record*, in *Fracture Mechanics, Thirteenth Conference*, ASTM STP 743, 1981, 476-502.
- 19 - I. Milne, *An EGF Exercise in Predicting Ductile Instability: Phase 1, Compact Specimens*, *Fatigue and Fract. Engng. Mat. and Struct.*, 9, 1986, 79-94.
- 20 - J. Pan, J. Ahmad, M.F. Kanninen, C.H. Popelar, *Application of Tearing Instability Analysis for Strain-Hardening Materials to a Circumferentially Cracked Pipe in Bending*, in *Fracture Mechanics: Fifteenth Symposium*, ASTM STP 833, 1984, 721-745.