

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

VALUTAZIONE DELLA TENACITA' A FRATTURA DI UN COMPONENTE ESERCITO
UTILIZZANDO PROVINI CILINDRICI CON INTAGLIO CIRCONFERENZIALE

Enrico Lucon - CISE SpA, Via Reggio Emilia 39, 20090 SEGRATE (Milano)

SOMMARIO

Per la valutazione dell'integrità e stabilità dei materiali di componenti eserciti è essenziale riuscire a caratterizzarne le proprietà meccaniche utilizzando la minor quantità di materiale possibile: sono dunque di fondamentale importanza provini *sub-size* o miniaturizzati. Nel campo della tenacità a frattura in regime Lineare Elastico, viene qui presentato e descritto un tipo di provino alternativo che consente un notevole risparmio di materiale rispetto ad altri di tipo convenzionale (Compact Tension o Three Point Bend): il provino cilindrico con intaglio circonferenziale, precriccato a fatica rotante e provato in trazione. Sono stati provati, nell'ambito di programmi di ricerca finanziati e coordinati da ENEL/CRTN di Milano, provini con diverse dimensioni, materiali e temperature, integri e ricostruiti. Vengono discussi i risultati ottenuti in termini di K_{Ic} in funzione di alcune delle variabili sperimentali (diametro esterno, profondità della cricca, eccentricità del legamento); si propone inoltre un criterio di tipo dimensionale per la significatività dei dati di tenacità critica ottenibili con questo tipo di provini. Compatibilmente con i propri limiti di applicabilità, il provino cilindrico si dimostra un mezzo economico, semplice e veloce per la determinazione della tenacità a frattura di un materiale fragile.

INTRODUZIONE

Per la valutazione delle condizioni di degrado microstrutturale e meccanico di un componente esercito ad elevata temperatura è di fondamentale importanza poterne caratterizzare le proprietà meccaniche, con particolare riguardo per la tenacità a frattura (soprattutto per quei componenti che possono aver subito fenomeni di infragilimento dovuti all'esercizio a temperature oltre i 400 ÷ 500 °C). Dati di progetto o specifiche originali, quand'anche fossero disponibili, sono di scarsa utilità, in quanto non forniscono alcuna informazione sulle effettive condizioni a cui il componente è pervenuto a seguito dell'esercizio: l'unica possibilità è dunque tentare di determinare, o per lo meno di stimare con sufficiente attendibilità, le proprietà meccaniche reali del componente utilizzando la massima quantità di materiale che il gestore dell'impianto possa fornire, senza dover smantellare o distruggere il componente stesso: cioè molto poco. Da qui la fioritura, negli ultimi anni, di metodologie sperimentali alternative e provini di dimensioni ridotte che consentono di ottenere il massimo delle informazioni dal minimo di materiale campionato /1,2/.

La situazione è particolarmente critica per la determinazione della tenacità a frattura di un materiale fragile: le normative correnti (per tutte la ASTM E399-90) impongono requisiti dimensionali di tale severità che nella valutazione della vita residua di un componente esercito è praticamente

impossibile ottenere dati validi di K_{Ic} su provini di geometria tradizionale (*Compact-Tension*, C(T), o *Three-Point-Bend*, SEN(B)). Tali provini, inoltre, quand'anche fosse possibile realizzarli di dimensioni tali da soddisfare le normative, risultano sicuramente ingombranti, costosi, difficili da precriccare e necessitano di macchine di prova con notevole capacità di carico.

Una decina di anni fa un gruppo di ricercatori cinesi /3/ propose un nuovo tipo di provino, di geometria abbastanza semplice rispetto ad un provino C(T), che per le sue caratteristiche poteva consentire un enorme risparmio di materiale rispetto ai provini convenzionali: una barretta cilindrica con intaglio circonferenziale (Fig.1), precriccata a fatica rotante e provata in trazione. Lo stesso provino, in tempi più recenti, fu ripreso da due ricercatori australiani che ne misero a punto la tecnica di prova e ne definirono i limiti di applicabilità /4,5/. Tra i vantaggi che i provini cilindrici possono garantire a priori, rispetto ai provini C(T) e SEN(B), si possono senz'altro citare i seguenti:

- la lavorazione meccanica è più semplice, quindi più economica e rapida;
- la precricatura e soprattutto la prova vera e propria sono molto più semplici e non richiedono apparecchiature sofisticate né elaborazioni complesse;
- la geometria dell'intaglio è tale da determinare una situazione di deformazione piana (*plane strain*) pressoché assoluta grazie alla triassialità dello stato di sforzo all'apice della cricca di fatica, indipendentemente dalle dimensioni del provino;
- quest'aspetto, in particolare, consente un elevatissimo risparmio di materiale rispetto ad un C(T) o un SEN(B).

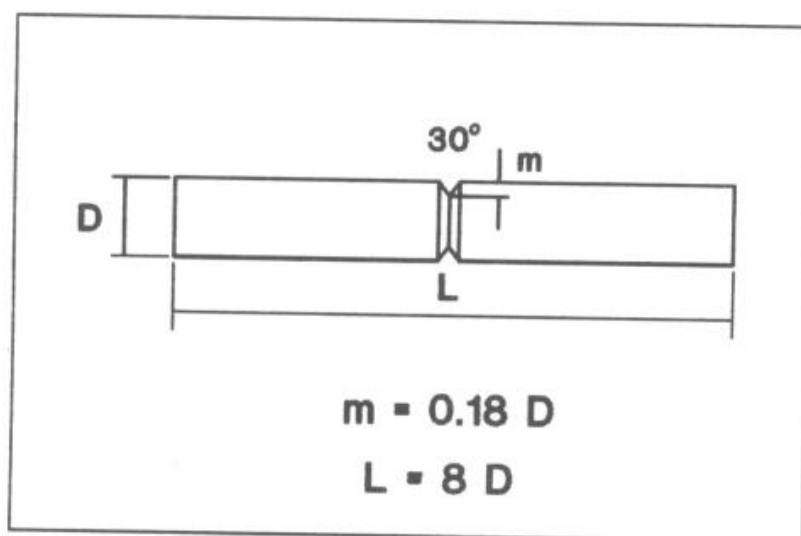


Figura 1

Le considerazioni sopra esposte hanno indotto il CISE e l'ENEL/CRTN ad impostare una campagna sperimentale durata 3 anni con l'obiettivo di convalidare questo provino ed definirne il campo di applicabilità, con un occhio di riguardo alle problematiche di Vita Residua. Tale lavoro va ad inserirsi nell'ambito dello sviluppo di metodologie di prova con campioni di tipo miniaturizzato, in corso da diversi anni presso il Laboratorio Prove Meccaniche del CISE /1,2/.

MODALITA' SPERIMENTALI

- Precriccatura

La precriccatura di un provino cilindrico viene eseguita su una macchina di flessione rotante, in grado di applicare al provino, lungo il tratto centrale, un momento flettente a diagramma trapezoidale: tale sollecitazione consente di ottenere l'innesco e la propagazione controllata di una cricca di fatica a simmetria approssimativamente circonferenziale in 150000 ÷ 200000 cicli. Particolare importanza ha, a questo riguardo, la precisione della lavorazione meccanica dell'intaglio: intagli di profondità irregolare o marcatamente asimmetrici possono compromettere il buon esito della precriccatura, in termini di durata e di simmetria della cricca di fatica.

Il monitoraggio della propagazione della cricca di fatica viene eseguito mediante un trasduttore magnetico montato sopra l'intaglio: le numerose prove eseguite hanno consentito di ottenere curve di calibrazione, per ogni dimensione di provino, che legano la deflessione segnalata dal trasduttore con la profondità della cricca ottenuta.

La scelta del carico da applicare alla macchina di flessione rotante viene eseguita calcolando, mediante formule proprie della macchina stessa, il valore del fattore di intensificazione degli sforzi K_{Ic}^{pc} applicato al provino durante la precriccatura: un valore intorno al 50% del K_{Ic}^{pc} ipotizzato per il materiale in esame consente l'ottenimento di una cricca di fatica sufficientemente profonda e ragionevolmente simmetrica. Va infine rilevato che i provini di dimensioni più ridotte ($D = 3 \div 4$ mm) sono estremamente delicati e difficili da precriccare: più di metà dei provini di queste dimensioni, nel corso dell'attività descritta nel seguito, si sono rotti in fase di precriccatura.

Ottimizzando i diversi parametri sperimentali, si sono ottenuti tempi di precriccatura dell'ordine di 30 ÷ 60 minuti, nettamente inferiori dunque ai tempi normalmente impiegati per precriccare un provino tipo C(T) oppure SEN(B).

- Prova

La prova di tenacità statica su un provino cilindrico intagliato circonferenzialmente è di assoluta semplicità pratica, dal momento che coincide in tutto e per tutto con una classica prova di trazione; qualsiasi tipo di macchina di prova (servoidraulica, elettromeccanica ecc.) in grado di applicare al provino un carico crescente può essere utilizzata. In linea di principio, l'unico dato che serve per il calcolo della tenacità a frattura è il carico di rottura del provino; tuttavia, ogniqualevolta le condizioni sperimentali (dimensioni del provino, temperatura di prova, comportamento del materiale) portino ad una significativa deformazione plastica prima della rottura, può essere utile acquisire, tramite un estensimetro o più grossolanamente mediante lo spostamento della traversa della macchina di prova, l'allungamento del provino sino alla frattura: questo può consentire, in caso di palese non linearità del grafico carico/spostamento, di calcolare la tenacità critica utilizzando metodologie tipo *Equivalent Energy* (sul tipo di quella contemplata dalla normativa ASTM E992-86 per provini convenzionali), alle quali si farà cenno più avanti.

Tra le diverse formule riportate in letteratura per il calcolo della tenacità critica K_{Ic} (in $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$), è stata scelta la seguente /6/:

$$K_{Ic} = \frac{P_f}{D^{3/2}} \cdot F\left(\frac{d}{D}\right) \quad (1)$$

dove:

- P_f è il carico di frattura (kN);
- D è il diametro esterno del provino (cm);
- $F(d/D)$ è un fattore geometrico di valore sempre prossimo all'unità.

Il valore del parametro d (diametro del legamento) è ottenuto come

$$d = D - 2 \cdot a_{eff} \quad (2)$$

dove a_{eff} , lunghezza efficace della cricca di fatica, è data dalla somma tra il valore misurato sulla superficie di frattura ed un fattore correttivo che tiene conto della zona plastica all'apice della cricca:

$$a_{eff} = a_o + 0.018 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y}\right)^2 \quad (3)$$

con σ_y = sforzo di snervamento alla temperatura di prova (MPa).

MATERIALI E PROVE ESEGUITE

Per convalidare la geometria cilindrica ed definirne i limiti di applicabilità, sia in termini di materiali che di temperature, è stata svolta, nell'arco di 3 anni (1989 ÷ 1991) e nell'ambito di progetti di ricerca finanziati e coordinati da ENEL/CRTN di Milano, un'estesa attività sperimentale consistente in:

- prove su due acciai aventi caratteristiche di duttilità diverse;
- prove su campioni aventi diametri esterni diversi (da 3 a 12 mm);
- prove a T.A. e a 100 °C;
- prove su campioni integri e campioni ricostruiti per saldatura.

I materiali esaminati sono stati:

- acciaio ASTM A470 cl.B, fragile a temperatura ambiente ($K_{Ic} \approx 64 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$);
- acciaio A105, duttile a temperatura ambiente ($K_{Ic} \approx 223 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Le caratteristiche meccaniche a T.A. dei due acciai esaminati sono riportate nella Tab.1. Entrambi sono stati provati a T.A.; l'acciaio A470 anche a 100 °C. Di quest'ultimo materiale sono stati provati anche campioni ricostruiti.

Tabella 1

Acciaio tipo	Proprietà meccaniche a T.A.			
	σ_y (MPa)	σ_{lts} (MPa)	A (%)	Z (%)
A470 cl.B	650	790	15.5	50
A105	320	530	20	60

Sono state complessivamente eseguite, nell'arco dei tre anni di durata dell'attività:

- 36 prove (valide) a T.A. su provini di A470 aventi rispettivamente diametro esterno D = 3, 4, 5, 6, 9.4 e 12 mm;
- 19 prove (valide) a 100 °C su provini di A470 aventi diametro esterno D = 9.4, 12 mm;
- 23 prove (valide) a T.A. su provini di acciaio A105 aventi diametro esterno D = 9.4, 12 mm;
- 16 prove (valide) a T.A. su provini di A470 di tipo ricostruito, 7 con inserto di lunghezza = 15 mm e 9 con inserto di lunghezza = 20 mm.

I risultati ottenuti dalle prove eseguite sono riassunti, in termini di valori medi, nella Tab.2; nella stessa tabella sono inoltre riportati i valori "di riferimento" della tenacità a frattura, ottenuti su provini di tipo convenzionale.

CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI OTTENUTI

■ Prove su acciaio A470

L'acciaio A470, sul quale è stata svolta gran parte dell'attività sperimentale, mostra comportamento fragile a T.A., come già rilevato; il valore di riferimento ($K_{Ic} = 64 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) è stato ottenuto su provini tipo C(T) con spessore B = 50 mm, secondo normativa ASTM E399-90.

I risultati ottenuti sono stati esaminati in funzione di alcune delle variabili sperimentali già considerate da altri autori, allo scopo di definire le condizioni ottimali per l'ottenimento di un valore affidabile di tenacità critica con questa geometria di provino.

a) Profondità della precricatura

Alcuni autori /5,6/ sostengono che una cricca di fatica poco profonda può alterare il grado di triassialità del campo di sforzi all'apice della cricca; in altri termini, la vicinanza dell'apice al fondo dell'intaglio meccanico potrebbe alterare le condizioni di *plane strain* pressoché assoluto che il provino garantisce e portare quindi ad una sovrastima del valore di tenacità a frattura (tipica delle situazioni di sforzo piano, *plane stress*). E' stato a tale riguardo suggerito /5/ un valore minimo per la profondità della cricca pari al doppio del raggio plastico $r_y = 1/6\pi \cdot (K_{Ic}/\sigma_y)^2$.

I risultati ottenuti a T.A. sono stati perciò esaminati in funzione della profondità della precricatura di fatica (a_0), Fig.2. Dall'esame della figura non si trova conferma di quanto affermato in letteratura: i valori K_{Ic} risultano distribuiti in maniera decisamente casuale e non si notano valori particolarmente elevati al diminuire del valore di a_0 .

Tabella 2

Acciaio	Temperatura (°C)	Tipo di provino	D (mm)	N° prove valide	K_{Ic} (MPa√m)	
A470	20	Cilindrico (integro)	3	1	42.8	
			4	5	42.3	
			5	6	42.04	
			6	5	52.6	
			9.4	10	55.1	
			12	9	58.9	
			Cilindrico (ricostr.)	9.4	16	57.8
			C(T)	Spessore B = 50 mm	3	64
	100	Cilindrico (integro)	9.4	9	61.1	
			12	10	65.7	
C(T)			Spessore B = 100 mm	1	160.1	
A105	20	Cilindrico (integro)	9.4	12	36.2	
			12	11	40.3	
		C(T)	Spessore B = 25 mm	4	$K_{Jc} = 224$	

b) Eccentricità del legamento

La profondità della precricatura viene misurata sulla superficie di frattura in otto posizioni angularmente equispaziate lungo il diametro esterno del provino: il valore a_0 è dato dalla somma tra la profondità dell'intaglio meccanico ed il valor medio delle otto misure di propagazione eseguite nelle posizioni indicate. Come indice dell'eccentricità del legamento prodotto dalla precricatura viene assunto il valore della deviazione standard percentuale delle otto misure di a_0 , che risulta infatti nulla per definizione quando le otto misure sono tra loro uguali, cioè quando il legamento risulta concentrico.

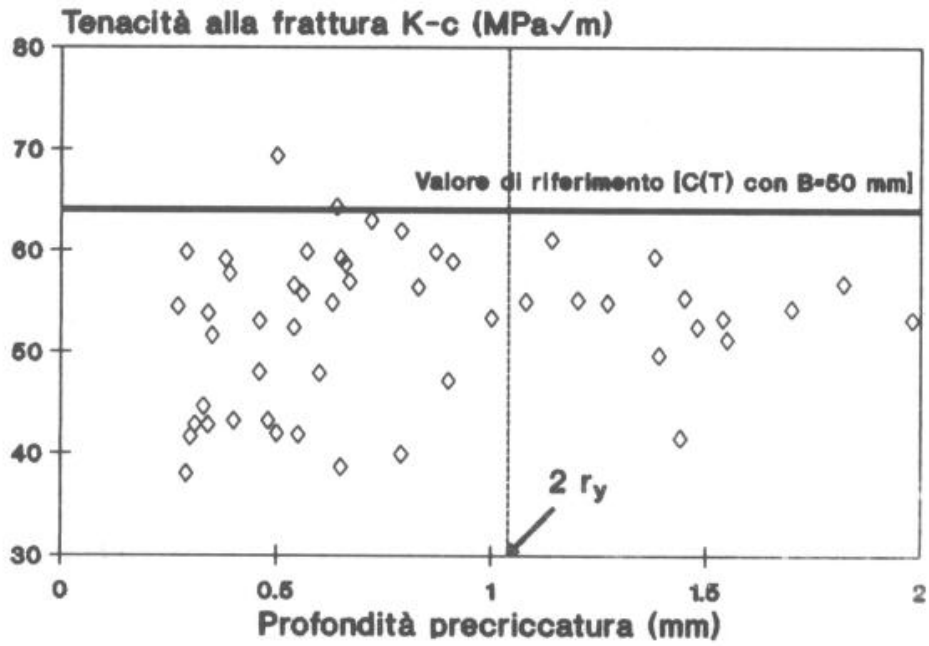


Figura 2

In letteratura /4,7/ si afferma che l'eccentricità del legamento tende ad abbassare il valore di K_{Ic} , in quanto introduce nello sforzo alla frattura una componente flessionale accanto a quella, preponderante, tensionale. Anche di tale influenza non si trova tuttavia riscontro nella Fig.3: i valori di K_{Ic} appaiono distribuiti in maniera, ancora una volta, del tutto casuale.

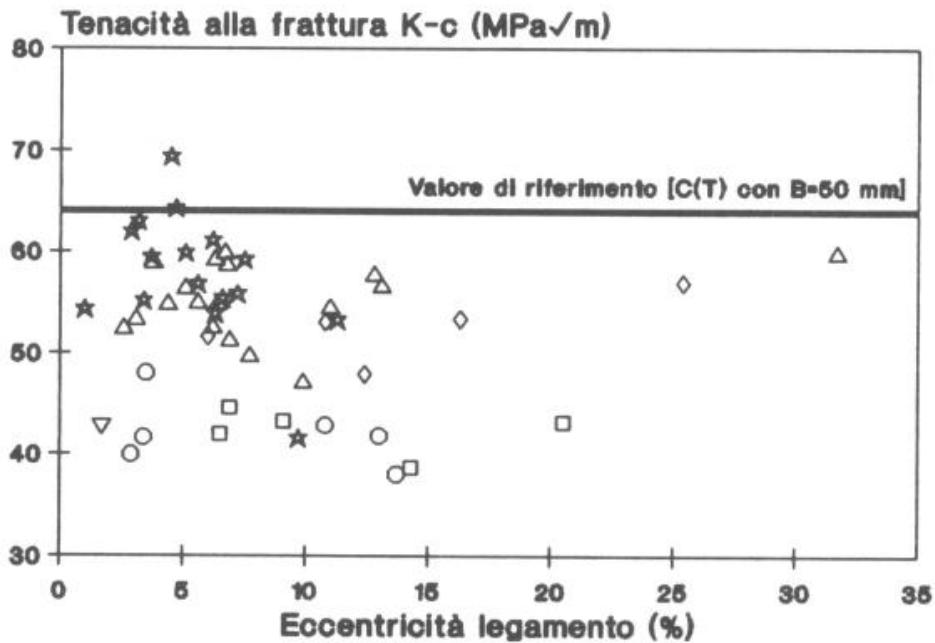


Figura 3

c) Dimensioni del provino

La Fig.4 mostra chiaramente che i valori di tenacità a frattura tendono a diminuire con le dimensioni (diametro esterno) del provino. Questo fenomeno, già evidenziato da diversi autori /3,5,6/, può essere agevolmente spiegato alla luce dello stato di sforzo che caratterizza un provino cilindrico all'apice della cricca di fatica.

Come già accennato in precedenza, in un provino cilindrico la simmetria circonferenziale della precricatura crea inevitabilmente una situazione di deformazione piana (*plane strain*) pressoché assoluta all'apice della cricca: infatti, per quanto piccolo possa essere il provino, sul fronte non esistono punti confinanti con superfici laterali in condizioni di *plane stress* (sforzo piano). Queste indurrebbero un aumento artificioso della tenacità del materiale consentendo al provino di contrarsi lateralmente prima della rottura (come avviene per geometrie tradizionali tipo C(T) oppure SEN(B) e provini di dimensioni ridotte).

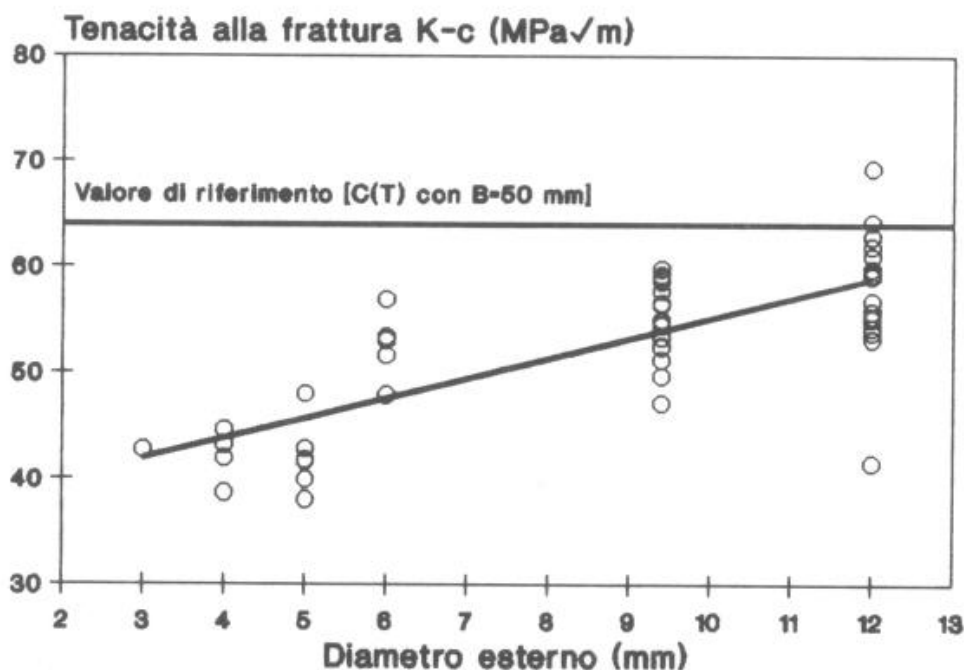


Figura 4

Per contro, in un provino cilindrico, la zona plastica all'apice della cricca in un suo punto può arrivare ad interagire con quella che caratterizza le zone del fronte ad essa simmetricamente opposte, provocando dunque una plasticizzazione generalizzata del legamento precedente la frattura; questo può avvenire, in particolare:

- quando il materiale, alla temperatura di prova, ha caratteristiche di elevata duttilità;
- quando il provino, e quindi il suo legamento, è di limitate dimensioni.

In queste eventualità, l'entità degli sforzi che portano alla rottura il provino, pur in una condizione di triassialità che, come già detto, non dipende dalle dimensioni, può superare quasi ovunque lo snervamento: calcolare la tenacità critica mediante la (1), formula rappresentativa di una condizione prevalentemente elastica, non può che portare ad una sottostima della tenacità

reale del materiale, sottostima tanto più marcata quanto meno la situazione fisica può essere descritta in termini di Meccanica della Frattura Lineare Elastica (LEFM).

In altri termini, si commette lo stesso errore che si commetterebbe utilizzando la formula per il calcolo del K_{Ic} secondo norma ASTM E399-90 su un provino tipo C(T) o SEN(B), rotti per clivaggio ma dopo evidente deformazione plastica; la sottostima, in questo caso, sarebbe tuttavia parzialmente compensata dall'aumento di tenacità già ricordato dovuto all'instaurarsi di fenomeni di *plane stress* per una quota significativa del fronte della cricca (in misura più contenuta nel caso di provini con scanalature laterali, o *side-grooves*). Tale compensazione, come si è detto, è invece da escludersi nel caso di un provino cilindrico.

Le considerazioni appena esposte sono state confermate da calcoli agli elementi finiti, eseguiti modellando, come casi esemplificativi, lo stato di sforzo al momento della frattura su due dei campioni provati, l'uno "piccolo" ($D = 4$ mm) e l'altro "grande" ($D = 12$ mm). Alcuni dei risultati ottenuti sono esposti nella Fig.5, dove è rappresentato, in funzione della distanza radiale dall'asse di simmetria del provino, l'andamento degli sforzi principali al momento della frattura (σ_y , in direzione del carico applicato, e σ_r , in direzione radiale sul piano della cricca).

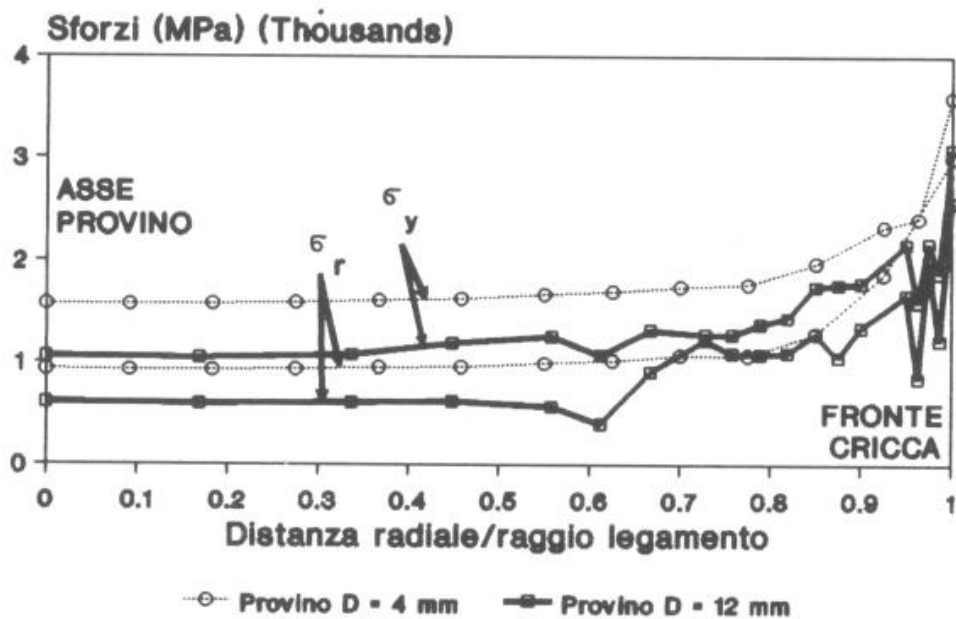


Figura 5

L'entità degli sforzi nel provino "piccolo" risulta nettamente più elevata di quella degli sforzi che si insorgono nel provino "grande"; in quest'ultimo il legamento si mantiene prevalentemente elastico sino alla frattura e la (1) consente dunque di calcolare un valore K_{Ic} sufficientemente vicino all'effettiva tenacità critica del materiale in esame.

Nella Fig.6 i risultati ottenuti sono rappresentati in funzione del diametro del legamento iniziale (d), a sua volta quantificato come multiplo del raggio plastico $r_y = (1/6\pi) \cdot (K_{Ic}/\sigma_y)^2$.

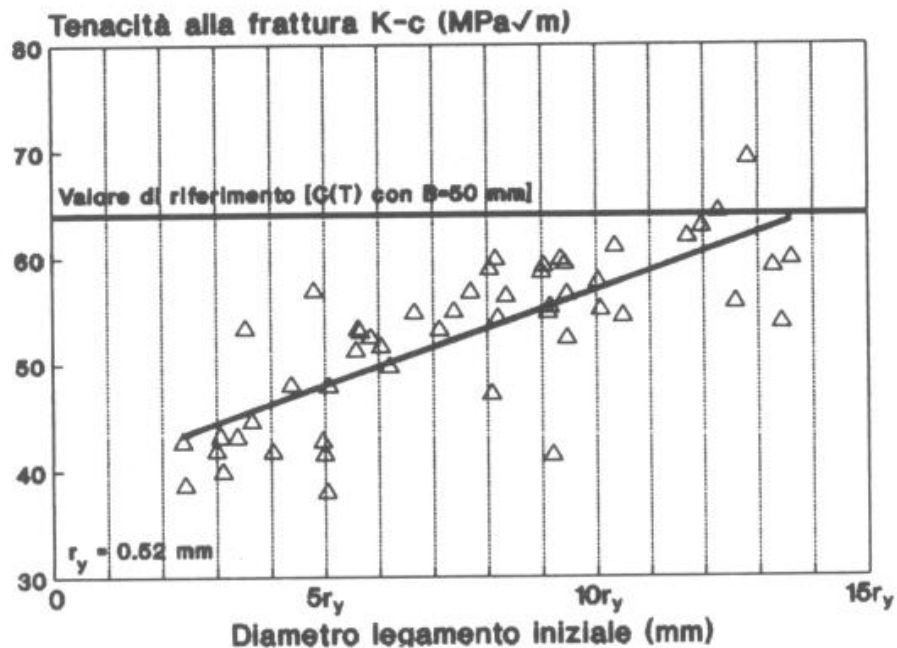


Figura 6

In base alla Fig.6, si può affermare che i valori calcolati sui provini cilindrici risultano sufficientemente rappresentativi del K_{Ic} del materiale (al più, leggermente conservativi), quando risulta:

$$d \geq 10 \cdot r_y \quad (4)$$

Supponendo che il provino sia precriccato in modo da ottenere $d/D \approx 0.5 \div 0.7$, la (4) consente di formulare il seguente criterio dimensionale di validità:

$$D \geq 1.1 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (5)$$

del tutto analogo, ma molto meno restrittivo, a quello imposto dalla norma ASTM E399-90 ($B \geq 2.5 \cdot (K_{Ic}/\sigma_y)^2$), e assai simile a quello suggerito dai ricercatori cinesi che per primi proposero questo tipo di provino /3/ ($D \geq 1.25 \cdot (K_{Ic}/\sigma_y)^2$).

d) Temperatura di prova

Nella Fig.7 sono rappresentati i valori ottenuti sui provini cilindrici dell'acciaio A470 a 100 °C, utilizzando due diametri diversi: $D = 9.4$ e 12 mm. Sulla base di quanto affermato precedentemente, non può stupire l'elevata differenza riscontrata tra il valor medio ottenuto sui provini cilindrici (65.7 MPa√m) ed il valore di riferimento (160.3 MPa√m).

Alla temperatura di 100 °C, la tenacità dell'acciaio in esame è sufficientemente elevata da provocare la pressoché completa plasticizzazione del legamento alla frattura per entrambi i tipi di provini: per le motivazioni già ampiamente esposte, i valori K_{Ic} ottenuti sottostimano quindi in misura sensibile l'effettiva tenacità a frattura del materiale.

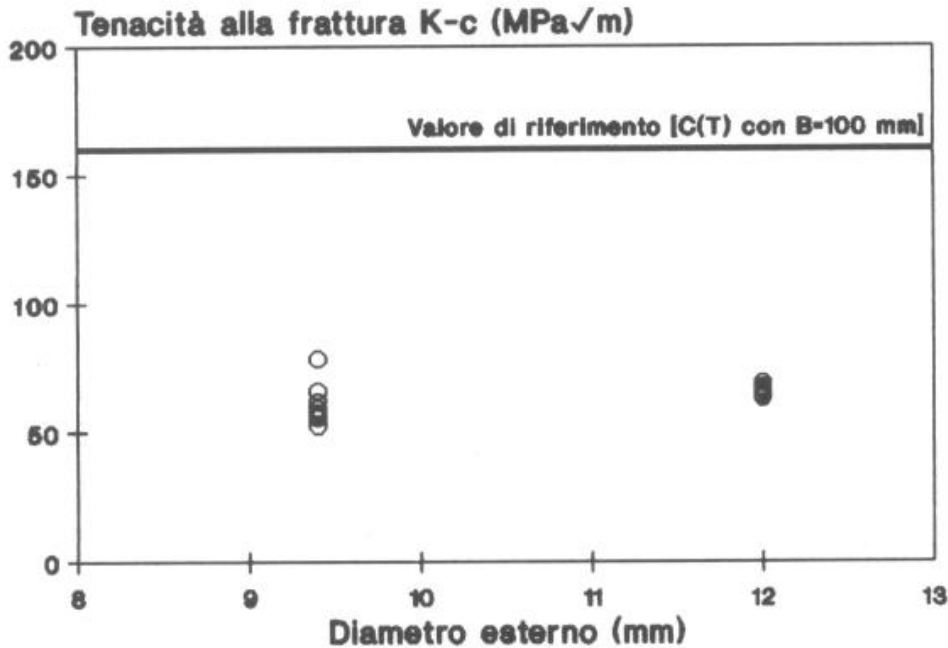


Figura 7

Provando ad applicare il criterio di validità (5), si ottiene infatti per questa temperatura:

$$D_{\text{min}} \approx 80 \text{ mm} .$$

e) **Provini integri e ricostruiti**

E' stata infine verificata l'applicabilità alla geometria cilindrica della tecnica di ricostruzione per saldatura a resistenza, già da lungo tempo utilizzata al CISE per la ricostruzione di provini di resilienza Charpy-V. L'impiego della tecnica di ricostruzione può infatti consentire un ulteriore risparmio di materiale, dal momento che ad un inserto centrale di materiale "prezioso" (di lunghezza non superiore a 20 mm) vengono saldate due code di acciaio tipo Fe37.

Sono state provate due serie di campioni ricostruiti con diametro esterno di 9.4 mm (ridotto a 9.24 dopo la saldatura), l'una con inserto da 15 mm, l'altra da 20 mm; l'obiettivo era di verificare se il processo di saldatura poteva indurre, soprattutto nei provini con inserto più corto, modifiche strutturali sensibili del materiale nella zona dell'intaglio, al punto da alterare il risultato della prova di tenacità.

I dati già riportati in Tab.2 mostrano che l'effetto della ricostruzione sui valori di K_{Ic} ottenuti è da ritenersi trascurabile; si è infatti ottenuto

$$\bar{K}_{Ic} = 55.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

per i provini con inserto da 15 mm, e

$$\bar{K}_{Ic} = 60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

per quelli con inserto da 20 mm. Entrambi i dati sono confrontabili con esito favorevole sia con il valore di riferimento (64 MPa√m) sia con quello ottenuto

su provini integri aventi pressappoco lo stesso diametro esterno (55.1 MPa√m). I provini cilindrici ricostruiti sono dunque da ritenersi attendibili nella stessa misura di quelli integri.

■ Prove su A105

I risultati ottenuti a T.A. su provini cilindrici con diametro esterno $D = 9.4$ e 12 mm dell'acciaio ferritico A105 (Fig.8) confermano quanto già emerso sull'acciaio A470.

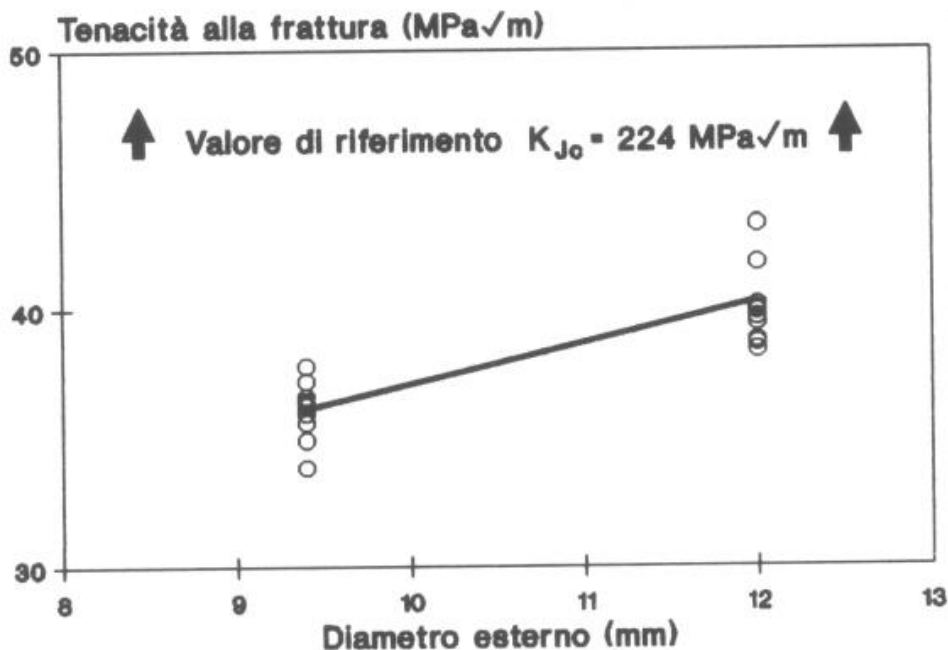


Figura 8

L'acciaio in esame esibisce comportamento completamente duttile a T.A., per cui il legamento del provino cilindrico risulta totalmente plasticizzato alla frattura: i valori K_{Jc} ottenuti, che risultano crescenti con le dimensioni del provino, sono lontanissimi dal valore reale della tenacità a frattura del materiale ($K_{Jc} = 224$ MPa√m, risultante da una serie di prove in regime elasto-plastico condotte su provini C(T) con spessore di 25 mm, secondo ASTM E813-87).

L'applicazione del criterio (5) porterebbe in questo caso ad un diametro minimo addirittura pari a 539 mm. Si deve perciò concludere che l'utilizzo dei provini cilindrici per caratterizzare la tenacità a frattura di materiali duttili, allo stato attuale delle conoscenze, è assolutamente improponibile.

FUTURI SVILUPPI

Le future linee di sviluppo, con l'obiettivo di estendere ulteriormente l'applicabilità di questo tipo di provino, dovranno perseguire la messa a punto di formule e/o metodologie in grado di calcolare il valore della tenacità critica in situazioni di natura prevalentemente elasto-plastica. A questo scopo, due sono le possibili direzioni di movimento:

- l'applicazione e la convalida di una delle metodologie tipo *Equivalent*

Energy già proposte in letteratura /8,9/ per il calcolo del valore critico di K attraverso l'energia fornita al provino per portarlo alla frattura;

- sempre nella stessa ottica di tipo "energetico", la definizione di una formula analitica per il calcolo dell'integrale- J per la geometria cilindrica; il valore di tenacità critica verrebbe desunto da questo in base alla ben nota relazione di equivalenza

$$K = \sqrt{J \cdot \frac{E}{1-\nu^2}}$$

CONCLUSIONI

1. Il provino cilindrico con intaglio circonferenziale, precriccato a fatica rotante e provato in trazione, rappresenta un metodo rapido, economico ed efficiente per caratterizzare la tenacità a frattura di un componente esercito in condizioni lineari elastiche; in particolare, esso consente un notevolissimo risparmio di materiale rispetto alle geometrie tradizionali (*Compact Tension* e *Three Point Bend*).
2. Il valore di tenacità a frattura K_{Ic} su un provino cilindrico, calcolato utilizzando semplicemente il carico di frattura, non dipende né dalla profondità della precricatura né dall'eccentricità del legamento iniziale.
3. Esso dipende invece pesantemente dalle dimensioni del provino; se il diametro esterno non soddisfa la relazione

$$D \geq 1.1 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2$$

il valore K_{Ic} sottostima l'effettiva tenacità del materiale a causa di una eccessiva plasticizzazione del legamento alla frattura.

4. Per lo stesso motivo, allo stato attuale dell'arte il provino cilindrico è inadatto a caratterizzare la tenacità a frattura di materiali duttili e comunque a temperature elevate.
5. Utilizzando la già collaudata tecnica di ricostruzione per saldatura, si può aumentare il risparmio di materiale impiegando provini di tipo ricostruito, che forniscono risultati del tutto confrontabili con quelli dei provini integri.

Ringraziamenti

L'Autore ringrazia l'ENEL/CRTN di Milano per aver autorizzato la divulgazione dei dati.

L'Autore desidera inoltre ringraziare i seguenti colleghi, preziosissimi collaboratori alla buona riuscita dell'attività descritta nel presente lavoro.

- L'Ing. Carlo Fossati e l'Ing. Valerio Bicego, per lo stimolante contributo scientifico alla (spero) corretta interpretazione delle fenomenologie osservate.
- L'Ing. Adriano Cella e l'Ing. Claudio Sampietri, per il supporto fornito per i calcoli agli elementi finiti.
- Il Dott. Mariano Radaelli, il Sig. Vittorio Cubuzio e il Sig. Umberto Galbusera, per la fondamentale collaborazione nell'esecuzione delle prove e nelle relative elaborazioni.

Bibliografia

- /1/ Bicego, V., Crudeli, R., Fossati, C., Lucon, E. e Ragazzoni, S., *Fracture Toughness and Fatigue Tests on Miniature Specimens for Plant Component Integrity Assessment*, Atti dell'ottava Conferenza Europea sulla Frattura, ECF8, Politecnico di Torino, 1-5 ottobre 1990.
- /2/ Bicego, V., D'Angelo, D., Lucon, E. e Fossati, C., *Evaluating a Serviced Component's Mechanical Properties by means of Sub-Sized and Miniature Specimens*, presentato all'ASTM Symposium on Small Specimen Test Techniques and Their Applications to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension, 29-31 gennaio 1992, New Orleans, Louisiana, USA (di prossima pubblicazione in una STP dell'ASTM).
- /3/ Wei, S., Tingshi, Z., Daxing, G., Dunkang, L., Poliang, L. e Xiaoyun, Q., *Fracture Toughness Measurement by Cylindrical Specimen with Ring-Shaped Crack*, Engineering Fracture Mechanics, Vol.16, No.1, 1982, pp.69-82.
- /4/ Stark, H.L. e Ibrahim, R.N., *Estimating Fracture Toughness from Small Specimens*, Engineering Fracture Mechanics, Vol.25, No.4, 1986, pp.395-401.
- /5/ Stark, H.L. e Ibrahim, R.N., *Validity Requirements for Fracture Toughness Measurements Obtained from Small Circumferentially Notched Cylindrical Specimens*, Engineering Fracture Mechanics, Vol.28, No.4, 1987, pp.455-460.
- /6/ Sih, G.C., *Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems*, Noordhoff Leyden, The Netherlands, 1973, pp.174-175.
- /7/ Stark, H.L. e Ibrahim, R.N., *Establishing K_{Ic} from Eccentrically Fatigue Cracked Small Circumferentially Grooved Cylindrical Specimens*, International Journal of Fracture, Vol.44, 1990, pp.179-188.
- /8/ Chang, W., *Measurement of Fracture Toughness K_{Ic} by Single Small-Scale Cylindrical Specimen with Ring-Shaped Crack*, Engineering Fracture Mechanics, Vol.28, No.3, 1987, pp.241-250.
- /9/ Chang, W., *Applying Similarity Methods to Fracture Mechanics - Measurement of Fracture Toughness K_{Ic} , K_{Ic} Values by Small-Scale Single Specimen*, Engineering Fracture Mechanics, Vol.28, No.3, 1987, pp.241-250.