

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

ANALISI COMPARATIVA DEI VALORI  
DI  $J_T$  OTTENUTI MEDIANTE  
L'APPLICAZIONE DI DIVERSE NORMATIVE

F. Romanini - S. Budano - G. Demofonti  
Centro Sviluppo Materiali  
Via di Castel Romano, 100 - 00129 ROMA

**SOMMARIO:** E' stata eseguita una rielaborazione di dati ottenuti da prove di  $J_T$ , con l'obiettivo di analizzare le variazioni dei valori di tenacità alla frattura, in termini di curva J-R e del valore all'innescò  $J_{IC}$ , dovute ai diversi algoritmi di calcolo suggeriti dalle normative ASTM E813 (81 ed 87) ed EGF P1-90.

In particolare, riguardo la normativa europea, è stato fatto riferimento al parametro  $J_{0.2/BL}$ , ritenuto più consono per la valutazione della fase di innescò.

L'analisi è stata compiuta impiegando dati provenienti da sperimentazioni eseguite utilizzando 6 diversi tipi di acciaio per diverse applicazioni: geotermia, trivellazione e vessels nucleari, sottoposti a prova a diverse temperature. Sono inoltre riportate alcune considerazioni riguardo la dispersione dei dati legata alla stima delle caratteristiche di incrudimento dei materiali.

#### INTRODUZIONE

La definizione teorica del parametro J-Integral suggerita da Rice /1/, per la determinazione della tenacità alla frattura di materiali a comportamento non lineare elastico, ha attivato concreti interessi per la realizzazione di prove sperimentali finalizzate sia alla valutazione del valore critico di tale parametro nella fase di innescò, sia nella prima fase di propagazione della cricca.

La difficoltà di interpretare correttamente i meccanismi legati sia all'innescò sia alla propagazione stabile duttile del difetto rende, a tutt'oggi, improbabile una versione definitiva della procedura di prova standardizzata.

L'obiettivo delle procedure sperimentali dettate dalle normative vigenti, riguarda la valutazione del parametro  $J_{IC}$ , tramite la determinazione della curva J-R (crack resistance), rappresentativa della resistenza opposta dal materiale in presenza di difetti.

I punti fondamentali su cui sono focalizzate le maggiori attenzioni delle procedure per l'esecuzione delle prove di  $J_{IC}$  sono i seguenti:

- Modalità di esecuzione delle prove monocampione e multi-

campione.

- Descrizione delle procedure per la tracciatura della "blunting line".
- Definizione della validità dei punti ottenuti dalle prove in termini di posizione nel piano  $J-\Delta a$  (integrale  $J$ -avanzamento della cricca) e reciproca spaziatura.
- Verifica dello stato di deformazione piana del campione, nel corso della prova.

La prima standardizzazione di procedure sperimentali, cui riferirsi per la valutazione dei parametri critici della Meccanica della Frattura in campo non lineare elastico, è stata la **ASTM E813 - 81 /2/**.

In essa, oltre le indicazioni pratiche per l'esecuzione della prova, sono riportate le formulazioni da utilizzare per una corretta determinazione del valore dell'integrale  $J$  in corrispondenza dell'innesco stabile duttile della cricca.

L'analisi delle coppie di valori  $J-\Delta a$ , ottenute sperimentalmente deve essere effettuata nel medesimo piano, tramite la definizione di, fig.1a:

- "blunting line", per tenere conto dell'arrotondamento dell'apice della cricca nella prima fase di avanzamento, con equazione  $J = 2 \sigma_y \Delta a$ ;
- due "exclusion lines", parallele alla blunting line ma con intercetta sull'asse  $\Delta a$  pari ad un'avanzamento fittizio  $\Delta a$  0.15 e 1.5 mm.

I punti compresi tra le due "exclusion lines" possono essere utilizzati, tramite la verifica della loro posizione nel piano e reciproca spaziatura fig. 1b, per l'interpolazione lineare, per l'ottenimento della retta  $J-R$ :  $J=C(\Delta a + B)$ .

L'intersezione di tale retta con la "blunting line" fornisce il valore critico dell'integrale  $J$ , il  $J_{Ic}$ .

Nel 1987, sono state apportate delle modifiche sostanziali alla precedente versione dell'ASTM, con la pubblicazione della normativa **ASTM E813 - 87 /3/**, fig.2a:

Le differenze principali consistono nell'aver definito con maggiore dettaglio la posizione dei punti nel piano  $J-\Delta a$ , in riferimento alla loro spaziatura, e nella formulazione analitica dell'equazione della curva  $J-R$  descritta con andamento curvilineo e non con l'approssimazione ad una retta come avveniva nella precedente versione 81.

Quest'ultima, ottenibile tramite una interpolazione lineare applicata ai logaritmi delle coordinate dei punti sperimentali, risulta infatti del tipo:  $J = C \Delta a^D$ , dove  $C$  rappresenta il valore assunto dall'integrale  $J$  per un avanzamento unitario della cricca e  $D$  l'esponente rappresentativo della curva stessa.

L'intersezione di tale curva con la retta parallela alla "blunting line", ma avente offset pari a 0.2 mm, fornisce il valore di  $J_{Ic}$ .

La procedura di prova EGF P1 - 90 /4/, proposta dal Gruppo Europeo Frattura, fornisce anch'essa le formulazioni per la valutazione di parametri critici rappresentativi della fase di innesco stabile duttile della propagazione della cricca, fig 3a.

Questa normativa definisce tre parametri critici:

- $J_{0.2/BL}$ , dove BL indica che le condizioni di innesco sono state ricercate facendo uso della "blunting line". In particolare viene misurata la tenacità del materiale in corrispondenza dell'intersezione della curva J-R con la parallela alla "blunting line" passante per  $\Delta a = 0.2$  mm, fornendo una definizione ingegneristica di "innesco";
- $J_{0.2}$ , che misura la resistenza del materiale per una crescita totale della cricca di 0.2 mm;
- $J_i$ , che corrisponde ai valori della resistenza a frattura alla fase di innesco.

Il  $J_i$  viene considerato il parametro più rappresentativo della fase di innesco, la cui esatta valutazione richiede un'accurata analisi microfrattografica da eseguire con l'ausilio di un microscopio elettronico (SEM). In questo caso la procedura trascurava dettagli sperimentali della misurazione in quanto non tutti i laboratori di prove sono dotati di una sezione di microscopia e quindi in grado di applicare la normativa.

$J_{0.2/BL}$  risulta quindi il parametro più utilizzabile della tenacità a frattura dei materiali a comportamento duttile.

$J_{0.2}$  ne fornisce, invece, i valori limite inferiori.

A differenza delle procedure proposte dall'ASTM, l'EGF P1 - 90 tiene meglio conto delle caratteristiche metallurgiche del materiale, introducendo, come input dei dati nella fase elaborativa, il coefficiente di incrudimento, 'n'.

Tale valore compare nella equazione della "blunting line", ed in particolare nella valutazione del parametro  $d_n^*$  che risulta essere funzione di 'n':  $d_n^* = f(n)$  e risulta essere un migliore approccio per descrivere il fenomeno di plasticizzazione del fondo intaglio antecedente la fase di innesco del difetto.

Le exclusion lines cui si fa riferimento, fig. 3, presentano un offset pari rispettivamente a 0.1 e  $\Delta a_{max}$  mm, dove  $\Delta a_{max}$  è il valore massimo della relazione  $0.6 (W - a_0)$  calcolata su tutti i campioni sottoposti a prova.

La determinazione dell'equazione della curva J-R risulta molto complessa, ed è esprimibile nella forma:

$$J = A (C + \Delta a)^D$$

dove A e C sono dei coefficienti opportuni che, insieme all'esponente D permettono la descrizione analitica della curva J-R.

## ANALISI COMPARATIVA TRA LE 3 PROCEDURE DI PROVA PER LA VALUTAZIONE DEL $J_{Ic}$

Avvalendosi di una serie di dati di prove di tenacità alla frattura, già disponibili al Centro Sviluppo Materiali di Roma, è stata effettuata una rielaborazione con l'obiettivo di ottenere risultati comparativi in accordo alle formulazioni proposte nelle tre procedure analizzate, i cui risultati sono riportati i tab.I.

I dati provengono da sperimentazioni effettuate su campioni CT di acciaio di vari tipi, a diverse temperature. In particolare, gli acciai cui si è fatto riferimento sono acciai per uso geotermico, per trivellazione e per utilizzo in campo nucleare (vessels e tubazioni in pressione).

Per quanto riguarda la procedura EGF P1 - 90, è stato fatto riferimento al parametro  $J_{0.2/BL}$  che sembra il più rappresentativo della fase di innescò stabile duttile della cricca, in campo non lineare elastico.

### CURVA J-R

Dall'analisi dei risultati, descritti per mezzo delle curve J-R, nel piano J- $\Delta a$ , emergono le differenze interpretative tra le tre normative considerate, ASTM E813 - 81 ed 87 ed EGF P1 - 90, sia per quanto riguarda le condizioni di accettazione dei punti sperimentali sia riguardo le modalità di interpolazione dei punti stessi per la descrizione della curva J-R e, di conseguenza, anche del valore del  $J_{Ic}$ .

### **Accettazione dei punti**

Le tre normative presentano delle differenze sostanziali nell'ambito delle verifiche richieste riguardo la spaziatura dei punti sperimentali, nel piano J- $\Delta a$ .

In particolare, le due versioni ASTM "consigliano" una spaziatura uniforme dei punti all'interno delle due exclusion lines (offset 0.15 e 1.5 mm), fig 1b e 2b, mentre la procedura EGF "impone" la presenza di almeno un punto in ognuna delle quattro uguali regioni di piano in cui si può dividere l'intervallo delimitato dalle exclusion lines stesse, fig 3b. La versione ASTM '81 non ammette il raggruppamento di punti sperimentali, fig 1b, a meno che tali punti non si trovino nei pressi della "blunting line".

Inoltre, sussistono delle differenze nella posizione di punti 'obbligati' nel piano J- $\Delta a$ :

- EGF 90: almeno un punto a distanza non superiore a 0.1 mm dalla retta parallela alla "blunting line" con offset 0.2 mm, sia a destra che a sinistra, fig 3b;
- ASTM 81: almeno un punto compreso tra la "blunting line" ed una retta ad essa parallela, con offset pari ad 1/3 della distanza massima tra la "blunting line" stessa ed il punto con ascissa ( $\Delta a$ ) mas-

la procedura sima, fig 1b;

- **ASTM 87:** almeno un punto nelle due regioni di piano delimitate dalle "exclusion lines" (offset 0.15 e 1.5 mm) e due rette ad esse parallele ma con offset rispettivamente di 0.5 e 1.0 mm, fig 2b.

Infine, ultima ma non meno importante, la limitazione massima per il valore critico dell'integrale J, legata alla verifica delle condizioni di deformazione piana, presenta due valori differenti:

$$\text{ASTM 81 ed 87} \quad J_{\max} = B \sigma_y / 15$$

$$\text{EGF} \quad J_{\max} = B \sigma_y / 25$$

Tale valore, definito come il limite superiore di validità per la teoria della "J-controlled crack growth" /4/, risulta quindi notevolmente minore secondo la formulazione proposta nella procedura EGF.

Con riferimento alle rielaborazioni eseguite è stato osservato che, in alcuni casi, le coppie di punti J- $\Delta a$  non hanno soddisfatto tutte le verifiche imposte dalla normativa EGF P1-90, sia riguardo la loro spaziatura sia il loro posizionamento nel relativo piano.

Questi scostamenti non sono però tali da lasciar pensare di aver perso, in modo sostanziale, la significatività dei risultati né aver fornito valori del  $J_{0.2/BL}$  considerevolmente differenti dal valore effettivo.

Tale fatto mette in evidenza la maggiore restrittività delle verifiche imposte dalla procedura proposta dall'European Group on Fracture. Dal punto di vista pratico è dunque emersa la necessità dell'utilizzo di un numero maggiore di campioni di prova per assicurare una corretta esecuzione delle procedure sperimentali ed una attendibilità completa del valore critico,  $J_{0.2/BL}$ , determinato.

#### Descrizione della curva J-R

Per maggiore chiarezza occorre bene evidenziare le tre differenti equazioni suggerite per la descrizione della curva J-R, fig. 1, 2, 3:

$$\text{ASTM E813 - 81} \quad J = C \Delta a + B$$

$$\text{ASTM E813 - 87} \quad J = C \Delta a^D$$

$$\text{EGF P1 - 90} \quad J = C (\Delta a + D)^B$$

Le tre curve, relative ad uno qualsiasi dei tre materiali analizzati, tendono a differire principalmente nella prima parte, nel tratto prossimo all'innescio del difetto, mentre il loro andamento è molto simile per valori di  $\Delta a$  più elevati, fase di propagazione stabile-duttile.

E' stato inoltre notato che laddove la spaziatura dei punti sperimentali è risultata più omogenea, la curva relativa alla procedura EGF tendeva ad assumere lo stesso andamento, e quindi a sovrapporsi, a quella descrivibile per mezzo della nuova normativa ASTM.

Questo mette ancora più in evidenza la necessità di un elevato numero di punti sperimentali per avere una buona elaborazione e quindi buona attendibilità riguardo la validità della prova effettuata.

### INNESCO $J_{IC}$

Poichè il valore critico di  $J_I$  viene valutato nel punto di intersezione tra la curva J-R e una retta parallela alla "blunting line", è necessario evidenziare le diverse modalità di valutazione di quest'ultima, e di conseguenza, la definizione delle "exclusion lines".

Tali differenze sono diretta conseguenza delle diverse interpretazioni fornite riguardo il processo di arrotondamento dell'apice della cricca. Le equazioni delle "blunting line" sono infatti differenti:

ASTM E813 - 81 ed 87

$$J = 2 \sigma_y \Delta a$$

EGF P1 - 90

$$\Delta a = 0.4 \frac{d_n^*}{E} J$$

Nella formulazione suggerita dall'EGF compare il coefficiente  $d_n^*$ . Tale coefficiente, come già accennato in precedenza, risulta essere dipendente dalle caratteristiche metallurgiche del materiale, ed in particolare dalle sue proprietà di incrudimento.

Il coefficiente di incrudimento,  $n$ , influisce quindi direttamente sulla pendenza ("slope") della "blunting line" (tab. II).

La "blunting line" graficata secondo le direttive della procedura europea, risulta maggiormente inclinata sull'asse  $a$ , rispetto alla stessa retta dell'ASTM.

Ciò influisce direttamente sul valore critico dell'integrale  $J$ .

I valori critici del parametro  $J_I$  stimati sono stati graficati, per valori crescenti di tenacità, in fig.4.

Il grafico riporta valori di  $J_{IC}$  ottenuti per i diversi acciai considerati, in un buon intervallo di valori, compresi tra  $J_{IC}$  100÷600 KJ/m<sup>2</sup>.

In fig. 5 è riportato il grafico lineare degli scarti ottenuti confrontando i valori di  $J$  valutati all'innescò in accordo alle 3 normative analizzate. Valori positivi dello scarto indicano che il primo valore risulta essere conservativo rispetto al secondo (caso EGF/ASTM 81). Il massimo scarto tra i valori è stato ottenuto tra i valori di tenacità dedotti dal-

la procedura EGF rispetto a quella ASTM 87, ottenendo, in quest'ultimo caso, valori decisamente meno conservativi. Per bassi valori di tenacità gli scarti sono risultati contenuti, mentre risultano notevoli nelle rielaborazioni degli acciai siglati COUPB e COUPA, Tab I, ottenendo una massima differenza intorno al 70%.

In generale si può concludere che, per gli acciai esaminati, i valori di  $J_T$ , valutati all'innesco, ottenuti tramite l'applicazione delle formulazioni proposte dall'ASTM versione 89 sono risultati sistematicamente più elevati rispetto a quelli ottenuti con le espressioni definite dall'ASTM 81 e dall'EGF P1 - 90.

Ciò può essere interpretato come una minore conservatività dei risultati ottenuti con la nuova rielaborazione rispetto al valore critico precedentemente valutato (ASTM E813-81). La procedura 87 ammette, infatti, che avanzamenti della cricca in precedenza ritenuti al di sopra della soglia critica, possano essere sostenuti dal medesimo materiale. Questo fatto potrebbe essere interpretato come una diminuzione del coefficiente di sicurezza legato alla stabilità strutturale.

Questo risultato rende, pertanto, validi i risultati sperimentali ottenuti nel corso delle prove effettuate precedentemente (1981-87) la pubblicazione della nuova versione ASTM. I risultati ottenuti con l'applicazione delle formulazioni suggerite nella procedura EGF P1 - 90 sono, invece, sistematicamente inferiori rispetto a quelli sopra citati.

Ciò è principalmente dovuto alle differenti equazioni sia della curva J-R sia della "blunting line".

La presenza del valore del coefficiente di incrudimento nell'equazione della blunting line pone il problema della necessità o meno di prove "ad hoc", per la valutazione precisa di tale coefficiente.

In tab.II sono riportati i valori di alcuni parametri, tra cui il  $J_{0.2/BL}$ , che risultano dipendenti dal valore di  $n$  utilizzato, calcolati per uno dei materiali utilizzati.

Si può osservare che le variazioni effettive del parametro critico  $J_{0.2/BL}$  rimangono entro margini del  $\pm 10\%$ , per valori di  $n$  compresi tra 0.1 e 0.2 (intervallo già molto ampio se si considera che il coefficiente di incrudimento, per acciai di questo tipo, assume sempre valori prossimi a  $0.12 \div 0.13$ ).

Tale minima variazione permette quindi l'utilizzo di dati di letteratura, potendo quindi tralasciare, a meno di elevate precisioni richieste, l'effettuazione di prove mirate alla sola valutazione del coefficiente di incrudimento.

## CONCLUSIONI

Sono state analizzate le 3 principali procedure di prova, ASTM E 813-81 ed 87 ed EGF P1-90, per la valutazione del valore critico dell'integrale  $J$ , in corrispondenza dell'innesco della propagazione stabile duttile della cricca.

Sono state illustrate le differenze sostanziali sia nell'equazione definita per descrivere la curva J-R, della "blun-

ting line", sia nelle verifiche imposte ai singoli punti sperimentali per assicurare la piena validità della prova. In particolare le diverse curve J-R, ottenute applicando le 3 diverse procedure, sono risultate sostanzialmente differenti per bassi valori di  $\Delta a$ , ovvero durante la fase di innesco del difetto, per poi risultare pressoché simili durante la fase di propagazione.

La comparazione dei valori critici è stata effettuata sui parametri  $J_{IC}$ , per quanto riguarda le normative ASTM, e  $J_{0.2/BL}$ , proposto dall'EGF.

La soglia critica valutata in accordo alle formulazioni proposte dall'ASTM 87 è risultata sistematicamente superiore rispetto alle altre, con differenze crescenti al crescere della tenacità del materiale considerato.

I valori di  $J_{0.2/BL}$ , sempre inferiori rispetto a quelli dedotti dall'ASTM, sono risultati strettamente dipendenti dalla omogeneità della spaziatura dei punti J- $\Delta a$ , sul medesimo piano, ottenuti nel corso della prova.

Questo risultato suggerisce l'utilizzo di un maggior numero di campioni di prova, o punti nel piano J- $\Delta a$ , rispetto ai 5 suggeriti dalla normativa stessa, per garantire una migliore attendibilità dei risultati sperimentali.

L'utilizzo del valore esatto, e quindi misurato sperimentalmente sul materiale in esame, del coefficiente di incrudimento 'n' è risultato non necessario per la valutazione accurata di  $J_{0.2/BL}$ , la cui variazione resta entro limiti di  $\pm 10\%$  per valori di 'n' compresi tra 0.1 e 0.2.

## BIBLIOGRAFIA

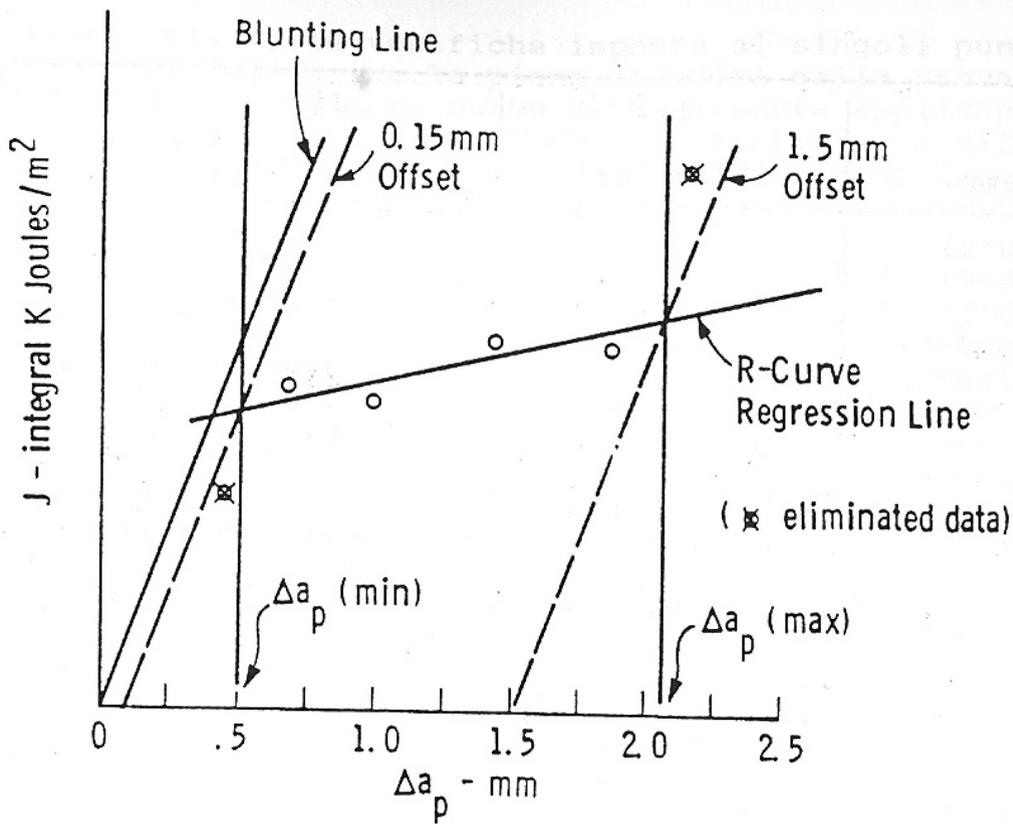
- 1) Rice, J.R. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. Appl. Mech, (1968) pp. 370-386.
- 2) ASTM Standard, 1981, E813-81. " $J_{IC}$ , A measure of fracture Toughness", Section 3, Vol 03.01.
- 3) ASTM Standard, 1987, E813-87. " $J_{IC}$ , A measure of fracture Toughness", Section 3, Vol 03.01.
- 4) EGF P1-90, EGF Raccomandation for Determining the Fracture Resistance of Ductile Material, Dec. 1989.
- 5) Hutchinson, J.W. and Paris, P.C. Stability Analysis of J-Controlled Crack Growth. ASTM STP 668, (1979) pp. 37-64.

Sigla camp.	Jic (ASTM '81)	Jic (ASTM '87)	J 0.2/BL (EGF P1-90)
THE (200°C)	90	101.86	108.47
BTE (200°C)	167	194.79	164.03
GAE (200°C)	217	280.35	213.8
COUPB (200°C)	374	516	304.47
COUPA (200°C)	419	516.34	332.05
BTE (23°C)	423	443.72	341.62
AJ (200°C)	425	558.77	393.85
AJ&BJ (200°C)	444	574	403.38
BJ (200°C)	527	627.22	394.28

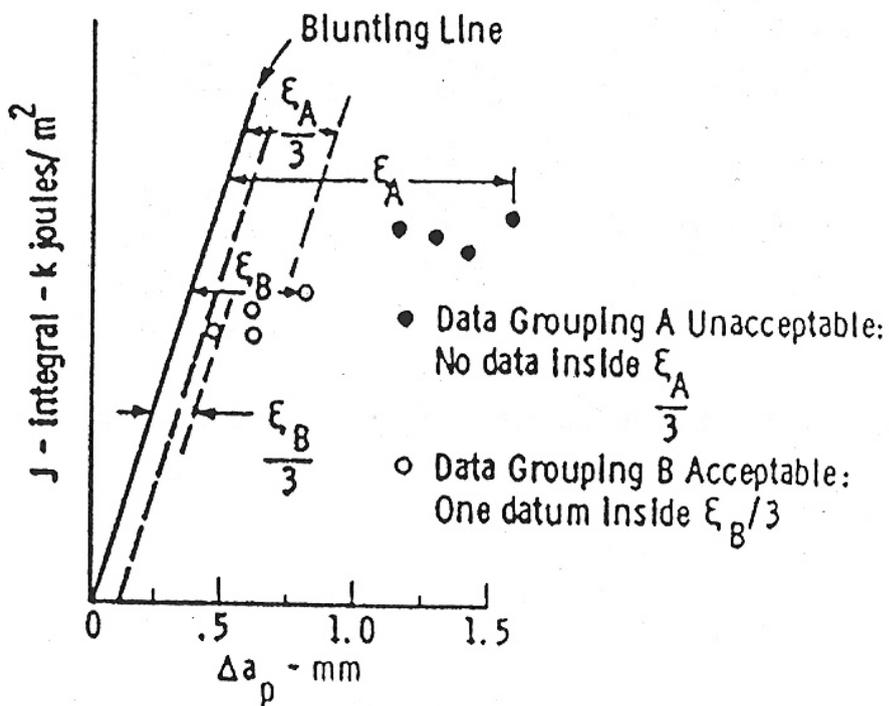
Tab. I. Valori dei parametri critici calcolati in accordo alle 3 normative

n	Sig. zero (MPa)	Eps. zero (mm)	dn*	J 0.2/BL
0.100	682.717	3.314	158.775	333.759
0.110	678.863	3.295	153.057	336.205
0.120	694.943	3.276	147.536	337.835
0.130	670.957	3.257	142.208	339.517
0.140	666.902	3.237	137.069	341.251
0.150	662.778	3.217	132.113	343.040
0.160	658.581	3.196	127.337	344.883
0.170	654.311	3.176	122.732	346.782
0.018	649.966	3.155	118.294	349.860
0.190	645.543	3.134	114.017	352.231

Tab. II. Valori di J0.2 BL in funzione del coefficiente di incrudimento 'n'

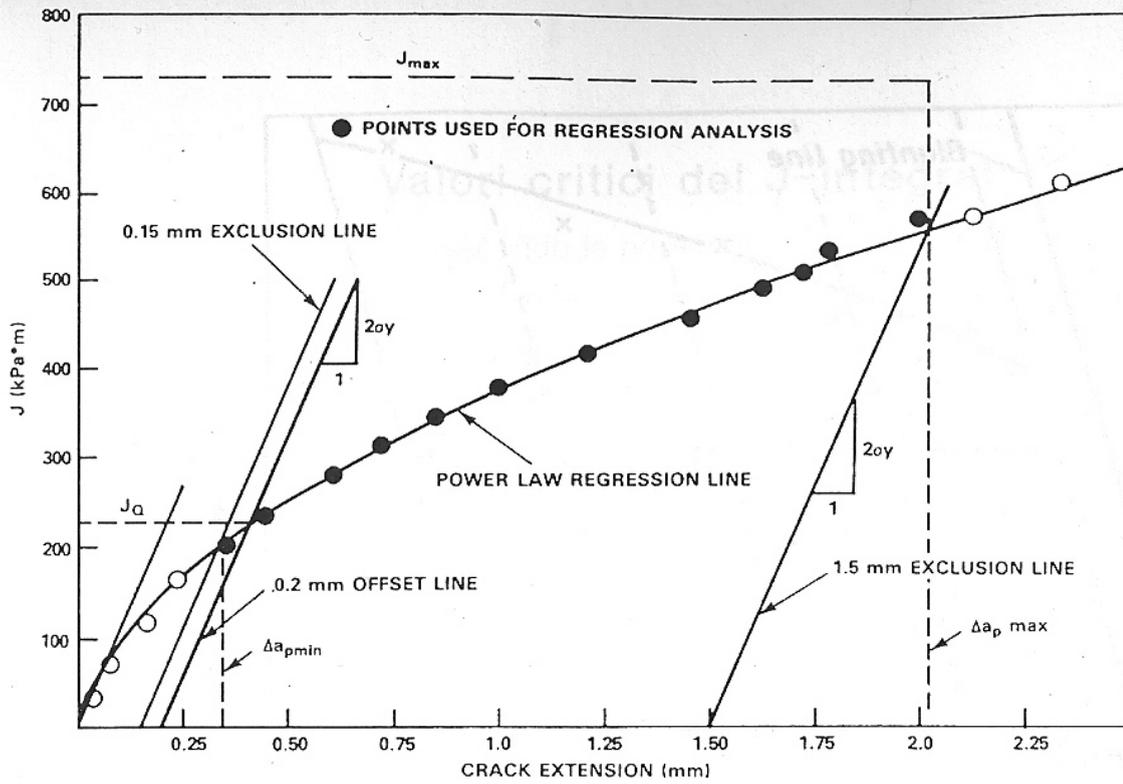


a) Curva J-R

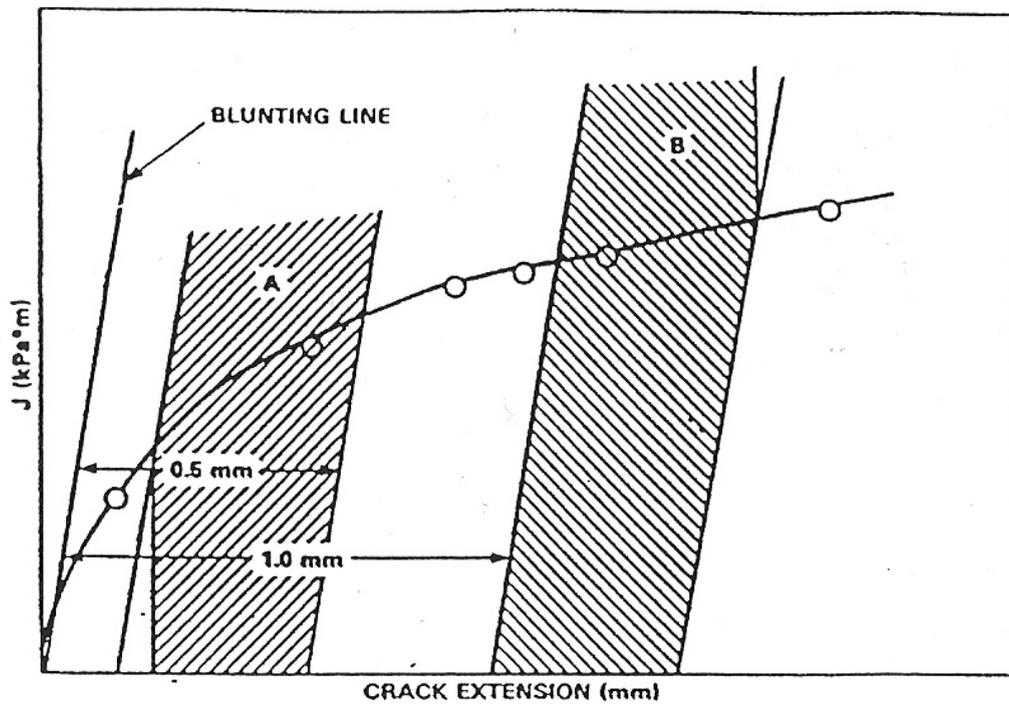


b) Criterio di validità dei punti sperimentali

Fig. 1. Curva J-R ripresa dalla normativa ASTM E 813 - 81

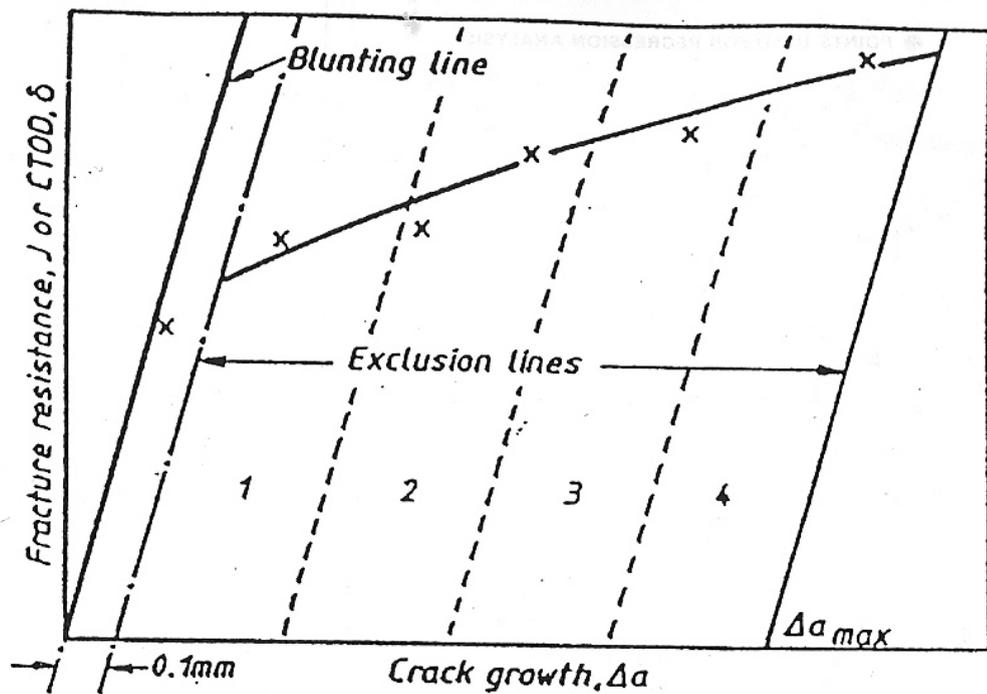


a) Curva J-R

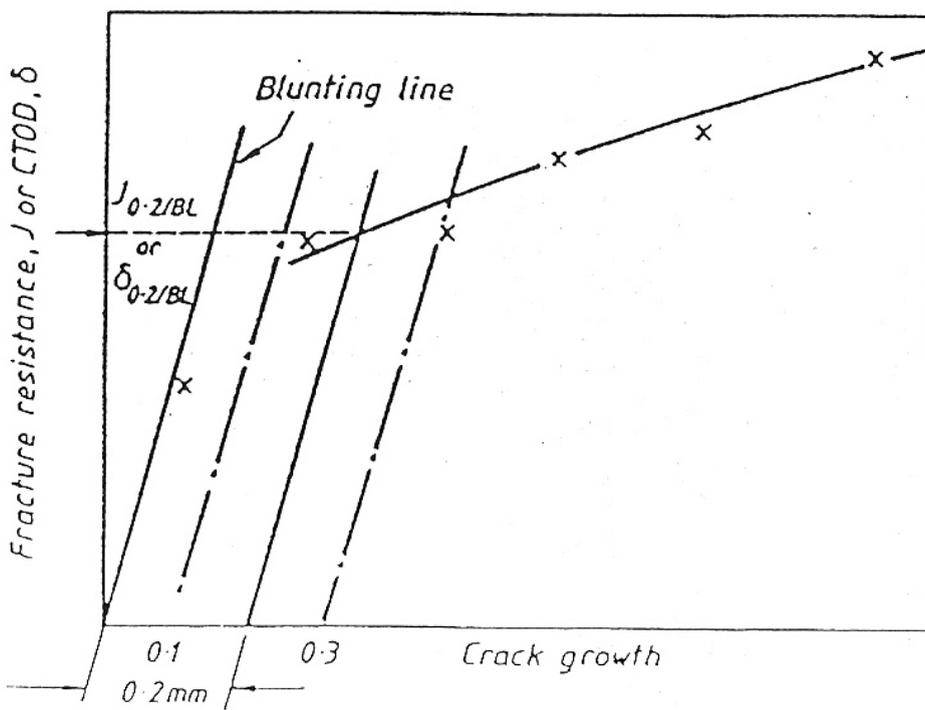


b) Criterio di validità dei punti sperimentali

Fig. 2. Curva J-R ripresa dalla normativa ASTM E 813 - 87



a) Criterio di validità dei dati



b) Definizione della fase di innesco

Fig. 3. Curva J-R ripresa dalla normativa EGF P1 - 90

STUDIO Sperimentale Sulla Propagazione A Fatiga Di  
 Piccole Cricche In Un Acciaio 21Cr1Mo

### Valori critici del J-integral

(secondo le normative analizzate)

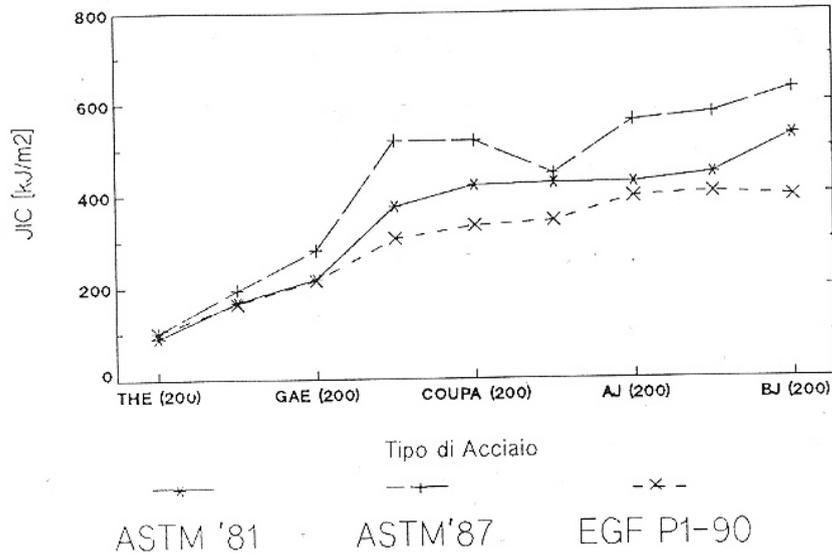


Fig. 4. Valori critici del parametro  $J_i$  per valori crescenti di tenacità

### Scarti dei valori di $J_{ic}$ ottenuti con le diverse normative

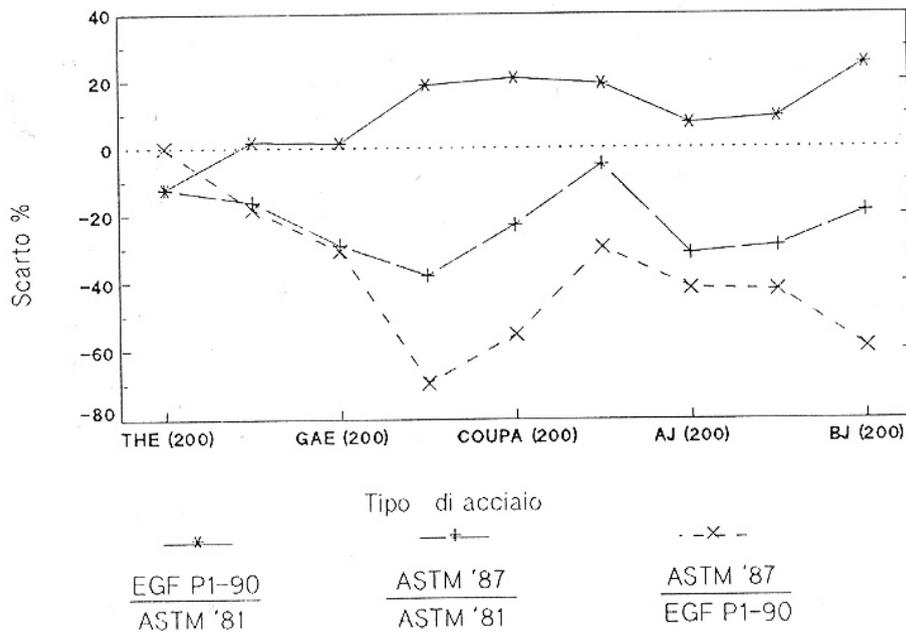


Fig. 5. Grafico lineare degli scarti dei valori di  $J_{ic}$  ottenuti con le 3 diverse normative analizzate, eseguito per valori crescenti di tenacità