

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

**METODI ALTERNATIVI PER LA MISURA DEL LOAD-LINE DISPLACEMENT
IN PROVE DI MECCANICA DELLA FRATTURA**

Enrico Lucon

CISE SpA, Via Reggio Emilia 39, 20090 SEGRATE (MILANO)

SOMMARIO

La misura dell'apertura di un provino C(T) lungo la retta di applicazione del carico è un dato essenziale per l'elaborazione di una prova di Meccanica della Frattura, sia in regime elasto-plastico sia in regime lineare elastico o di transizione. In ogni caso, il segnale del "load-line displacement" (LLD) è necessario per la corretta valutazione della tenacità critica del campione provato.

Vi sono tuttavia condizioni sperimentali che non consentono l'utilizzo di un trasduttore per la misura diretta del LLD (il cosiddetto *clip-gage*), quali prove su campioni miniaturizzati e prove a temperatura elevata ($T \geq 300$ °C).

Metodi alternativi per la misura del LLD su provini di tenacità statica nelle condizioni descritte sono stati messi a punto presso il Laboratorio Materiali del CISE, nell'ambito di progetti di ricerca sponsorizzati da ENEL-CRTN; essi vengono qui descritti, insieme ai risultati di apposite campagne sperimentali finalizzate alla loro convalida.

INTRODUZIONE

Le prove di Meccanica della Frattura comportano normalmente l'utilizzo di uno strumento che misuri lo spostamento del punto di applicazione del carico sul campione. Questo trasduttore di spostamento, denominato con termine inglese *clip-gage* (o *clip-on-gage*), ha la funzione di monitorare, nel caso del provino più comunemente utilizzato nella pratica di laboratorio (il provino *Compact-Tension*, C(T)), l'apertura del campione per effetto del carico applicato lungo una retta coincidente con l'interasse dei fori: a tale scopo, il *clip-gage* viene applicato a due lamette saldate alla bocca del campione, opportunamente lavorata (Fig.1). L'allontanamento delle lamette durante la prova viene rilevato dagli estensimetri del trasduttore e

monitorato sotto forma di segnale elettrico.

Questo segnale, comunemente detto "load-line displacement" (LLD), è in alcuni casi utile e in altri indispensabile in fase di elaborazione di una prova di tenacità statica, a seconda del comportamento del materiale nelle specifiche condizioni di prova.

Con riferimento alla curva tenacità-temperatura di un materiale metallico, si possono distinguere tre regioni (Fig.2):

- a) Comportamento fragile (prova in regime lineare elastico): il valore critico del fattore di intensificazione degli sforzi all'innesco della frattura per clivaggio (K_{IC}) viene calcolato secondo le norme ASTM E399 o UNI 7969 utilizzando soltanto il carico di rottura. Tuttavia la possibilità di applicare tale procedura viene verificata in base alla linearità del grafico carico/LLD, che costituisce il primo dei requisiti che una prova in regime lineare elastico deve soddisfare.
- b) Comportamento misto duttile-fragile (prova in regime di transizione): se la rottura del provino per clivaggio è associata ad una componente plastica non trascurabile, la tenacità critica può essere calcolata secondo il metodo dell'*Equivalent Energy* /1,2/ descritto dalla norma ASTM E992. In questo caso, il calcolo del valore K_{EE} è legato alla determinazione di due aree sottese dal grafico carico/LLD: l'area al carico massimo e un'area scelta nella parte lineare del grafico stesso. Alternativamente, oppure qualora la rottura per clivaggio sia stata preceduta da una significativa crescita duttile della cricca, può essere calcolato il valore dell'integrale-J all'instabilità: nel qual caso si ricade nell'ipotesi seguente.
- c) Comportamento duttile (prova in regime elasto-plastico): il parametro che può efficacemente caratterizzare il campo sforzi-deformazioni all'apice della cricca è l'integrale-J, che rappresenta l'energia fornita al provino per far propagare la cricca, normalizzata alla geometria e alle dimensioni del campione; esso viene perciò calcolato in base all'area sottesa dal grafico carico/LLD.

Vi sono tuttavia situazioni sperimentali "anomale" nelle quali l'impiego di un *clip-gage* di tipo convenzionale è sconsigliabile o, addirittura, improponibile; nel presente lavoro ne vengono considerate due, con le relative soluzioni messe a punto e convalidate presso il Laboratorio Materiali del CISE, nell'ambito di programmi di ricerca sponsorizzati da ENEL-CRTN:

1. *Provini di dimensioni ridotte*, che non offrono spazio sufficiente all'applicazione di un normale *clip-gage* sulla linea di carico; in questa categoria rientrano i provini di forma rotonda (geometria *Disk-Shaped*, DC(T)) di diametro compreso tra 16 e 20 mm, che possono essere ricavati da operazioni di carotaggio eseguite su componenti o impianti soggetti a valutazioni di Vita Residua.
2. *Temperature di prova superiori a 300 °C*, alle quali non può essere utilizzato un *clip-gage* convenzionale ed eventuali soluzioni alternative (quali un estensimetro collegato al campione mediante barre di quarzo e mantenuto fuori dal forno) risultano difficoltose, poco affidabili e sicuramente costose.

I metodi descritti nel seguito rappresentano soluzioni di agevole applicazione e garantiscono una precisione accettabile nella valutazione, comunque ardua, della tenacità critica di un materiale metallico nelle particolari situazioni considerate.

Aspetti teorici

Se per provino miniaturizzato si intende un provino di spessore inferiore a 10 mm, è intuitivo che dimensioni tanto ridotte non consentono l'applicazione di un *clip-gage* di tipo convenzionale sulla linea di carico. Per ovviare all'impossibilità di misurare direttamente il LLD su questo tipo di campioni, è stato messo a punto presso il Laboratorio Materiali del CISE un *clip-gage* alternativo, denominato per la sua forma *clip-gage ad Ω* , adatto a prove su materiali che mostrano comportamento fragile o misto fragile/duttile.

Esso è costituito da una lamina di acciaio armonico piegata ad anello, sui lati della quale sono incollati due estensimetri, che viene saldata per mezzo di due linguette di rame alla faccia anteriore del provino, a cavallo dell'intaglio meccanico.

Questo *clip-gage* risulta particolarmente adatto ai provini con geometria sferica (*Disk-Shaped*), di diametro compreso tra 16 e 20 mm, che vengono ricavati da carotaggi di impianti, provati a temperature alle quali, come già detto, il materiale presenta marcata fragilità. Una tipica configurazione sperimentale è mostrata in Fig.3.

Il segnale fornito dal *clip-gage ad Ω* è numericamente superiore al LLD, in quanto esso misura l'allontanamento di due punti situati sulla faccia anteriore del campione, quindi più lontani dal fronte della cricca rispetto all'interasse dei fori. Occorre dunque valutare l'entità di questa sovrastima per tentare una correzione che riporti il segnale alla linea di carico: i primi tentativi sono stati di natura teorica.

Assumendo che le due metà del provino ruotino rigidamente intorno ad un punto che si può in prima approssimazione localizzare sul fronte della cricca, semplici considerazioni geometriche conducono alla formula:

$$LLD = \delta_{\Omega} \cdot \frac{a}{a + A} \quad (1)$$

- dove: - δ_{Ω} è il segnale del *clip-gage ad Ω* ;
 - a è la lunghezza della cricca;
 - A è la distanza tra linea di carico e interasse dei fori.

In alternativa, sono state prese in considerazione le relazioni analitiche proposte da Saxena e Hudak /3/ per il calcolo della cedevolezza elastica misurata su un campione C(T) fuori dalla linea di carico; se l'apertura del provino è monitorata sulla faccia anteriore, si ottiene:

$$LLD = \delta_{\Omega} \cdot \frac{b_0 + b_1 \cdot a/W + b_2 \cdot (a/W)^2 + b_3 \cdot (a/W)^3 + b_4 \cdot (a/W)^4 + b_5 \cdot (a/W)^5}{c_0 + c_1 \cdot a/W + c_2 \cdot (a/W)^2 + c_3 \cdot (a/W)^3 + c_4 \cdot (a/W)^4 + c_5 \cdot (a/W)^5} \quad (2)$$

- dove : - W è la larghezza del provino;
 - $b_0 \dots b_5$ e $c_0 \dots c_5$ sono coefficienti sperimentali riportati dai due autori, relativi alla cedevolezza misurata rispettivamente sulla faccia anteriore del provino e sulla linea di carico.

Occorre comunque ripetere che la (2) è rigorosamente valida soltanto per un campione C(T) e soltanto in campo lineare elastico.

L'entità del fattore correttivo (intesa come rapporto tra LLD e δ_{Ω}), ottenuto applicando la (1) o la (2), per valori di a/W nell'intorno di $0.5 \div 0.55$, è di circa 0.7; si è comunque voluto sottoporre a verifica sperimentale il valore risultante dai calcoli analitici.

Attività sperimentale

Sono stati provati, alle tre temperature di $-20, 0$ e 25 °C, tre campioni DC(T) dello spessore di 1" (25.4 mm) di un acciaio da rotore (prevalentemente fragile alle tre temperature considerate).

Sulla faccia anteriore del provino è stato saldato un *clip-gage ad Ω* dello stesso tipo, ma di dimensioni maggiori, di quello impiegato sui campioni miniaturizzati, di diametro sufficiente ad applicare al provino un *clip-gage* di tipo convenzionale sulla linea di carico. Tale configurazione sperimentale (mostrata nella Fig.4) ha consentito di registrare contemporaneamente, e sullo stesso provino, il segnale del *clip-gage ad Ω* ed il load-line displacement.

Nelle Figg.5 ÷ 7 sono riportate, per i tre campioni provati, le curve carico/spostamento ottenute dal *clip-gage ad Ω* e da quello tradizionale, insieme alla curva "corretta" applicando il fattore analitico (0.7): dal confronto tra le curve e dal rapporto ottenuto sperimentalmente si evince che la correzione teorica è insufficiente, e il valore effettivo è circa 0.6.

Ma l'aspetto di maggior importanza che emerge dalle prove eseguite è che il rapporto tra i due segnali si mantiene sostanzialmente costante durante tutta la prova, come evidenziano anche le Figg.8 ÷ 10. Basta allora osservare che un segnale di spostamento proporzionale al LLD permette l'applicazione rigorosa delle normative per il calcolo della tenacità critica sia in regime lineare elastico (K_{IC} : la linearità viene mantenuta) sia in regime di transizione (K_{FE} : il rapporto tra le aree resta lo stesso): si può dunque concludere che il segnale del *clip-gage ad Ω* , anche senza correzioni di sorta, consente l'elaborazione di una prova di tenacità statica eseguita su un provino miniaturizzato in campo fragile o misto fragile/duttile.

TEMPERATURE ELEVATE: METODO INDIRETTO

Aspetti teorici

I normali *clip-gages* hanno temperature di funzionamento generalmente non superiori a $280 \div 290$ °C, al di sopra delle quali l'efficienza dei collanti degli estensimetri è seriamente in discussione. Trasduttori di spostamento di tipo alternativo, che possono venire impiegati a temperature più elevate, sono di solito molto costosi, relativamente poco accurati e prevedono difficoltose condizioni di utilizzo: un esempio è dato dalla configurazione che prevede il provino collegato mediante barre di quarzo ad un *clip-gage* posizionato fuori dal forno. Per ovviare a questa situazione, presso il Laboratorio Materiali del CISE è stato messo a punto un metodo

per la valutazione indiretta del load-line displacement su provini di Meccanica della Frattura: metodologie indirette dello stesso tipo sono state datempo proposte per il campione SEN(B) (*Three-Point-Bend*) /4/ e persino citate dalle normative di prova.

Il segnale di spostamento del pistone (o della traversa) della macchina di prova, il cosiddetto segnale di *stroke*, può normalmente essere monitorato con ottima precisione tramite un LVDT; questo segnale può, in prima approssimazione, essere considerato equivalente al segnale di apertura del provino lungo la retta di applicazione del carico, ammettendo di trascurare le seguenti componenti:

- la cedevolezza del sistema di carico (giunti, prolunghe, filetti ecc.);
- le deformazioni elastiche degli afferraggi (ganasse, spine, ecc.);
- le deformazioni elastiche del campione in corrispondenza dei fori.

Pur ammettendo che le deformazioni del campione siano trascurabili, non può invece essere ignorato l'effetto della cedevolezza del treno di carico (uguale a zero soltanto nel caso idealizzato di un sistema infinitamente rigido). Ne consegue la necessità di stimare con precisione sufficiente l'entità degli effetti spuri sopra elencati, per poterne successivamente depurare il segnale di *stroke* acquisito. Questo viene ottenuto eseguendo una semplice prova di trazione su un campione C(T) privo di intaglio, avendo massima cura che:

- a) il provino sia del tutto identico a quelli di prova, sia dal punto di vista dimensionale (intaglio escluso) sia del materiale (orientazione e zona di prelievo comprese);
- b) la temperatura della prova sia la stessa delle prove successive;
- c) tutto il sistema di carico, con particolare riferimento agli afferraggi, sia rigorosamente lo stesso che verrà utilizzato in seguito.

Nelle condizioni descritte, i valori di *stroke* che vengono acquisiti durante la prova sul campione privo d'intaglio sono da attribuirsi esclusivamente alla cedevolezza del treno di carico e alle deformazioni del campione e degli afferraggi; è dunque possibile ricavare mediante regressione la curva di best-fit che rappresenta la funzione di cedevolezza del sistema di prova in funzione del carico applicato.

La funzione analitica che meglio approssima, sui diversi materiali e alle varie temperature, l'andamento dei dati sperimentali acquisiti è rappresentata dalla somma di una retta ed un esponenziale (se ne veda un tipico andamento in Fig.11):

$$\delta_{SC} = A + B \cdot P + C \cdot P^D \quad (3)$$

dove : - δ_{SC} è il segnale di *stroke* acquisito nella prova sul campione privo di intaglio, cioè la cedevolezza del sistema di carico;

- P è il carico applicato al provino;
- A,B,C,D sono coefficienti di best-fit determinati con il metodo dei minimi quadrati.

La (3) consente, nell'elaborazione delle prove successive, di ricavare i valori di load-line displacement a partire dai valori di carico (P) e di

stroke (δ_{camp}) acquisiti mediante la semplice relazione:

$$\text{LLD} = \delta_{\text{camp}} - \delta_{\text{sc}} \quad (4)$$

Il metodo descritto garantisce una precisione soddisfacente nel calcolo del LLD, particolarmente in condizioni sperimentali (materiale e temperatura) nelle quali la componente plastica prevale su quella elastica, quindi per prove in regime elasto-plastico e particolarmente a temperature elevate.

L'accuratezza del metodo non è comunque sufficiente a permetterne l'utilizzo per il calcolo della lunghezza della cricca mediante misure di cedevolezza elastica del campione, come previsto dalla metodologia monocampione dell'*Unloading Compliance*; lo sperimentatore dovrà perciò ricorrere alla tecnica multicampione (*Heat Tinting*) o all'altra tecnica monocampione del *Potential Drop*, nelle quali i valori di LLD determinati dalle (3) e (4) vengono utilizzati soltanto per il calcolo dell'integrale-J.

Attività sperimentale

La campagna sperimentale per la convalida del metodo indiretto di misura del LLD è consistita nel confronto tra i risultati ottenuti applicando il metodo stesso e utilizzando un *clip-gage* di tipo convenzionale nelle seguenti condizioni di prova:

- due materiali aventi comportamento meccanico opposto: un acciaio da rotore, caratterizzato da elevata fragilità anche a temperature superiori a quella ambiente (lo stesso utilizzato per la convalida del *clip-gage ad \varnothing*) e un acciaio inossidabile austenitico;
- temperature di prova comprese tra T.A. e 290 °C (massima temperatura di funzionamento del *clip-gage*);
- due geometrie diverse (*Compact-Tension* e *Disk-Shaped*);
- due spessori diversi (1" e 0.5");
- per l'acciaio inossidabile, due metodologie di prova: multicampione e monocampione (*Potential Drop*).

L'acciaio da rotore ha consentito la verifica del metodo indiretto in condizioni fragili o miste fragili/duttile, mentre l'acciaio inossidabile ne ha permesso la convalida in condizioni totalmente duttili.

Per ogni campione (o serie di campioni), è stato provato un campione privo di intaglio dello stesso materiale, delle stesse dimensioni ed alla stessa temperatura; successivamente, durante la prova "standard", sono stati acquisiti, oltre al carico, il LLD misurato dal *clip-gage* e il segnale di *stroke*.

Infine, sono state poste a confronto le elaborazioni eseguite utilizzando i valori di LLD "effettivi" (forniti dal *clip-gage*) e quelli dedotti applicando le (3) e (4). Nelle Figg.11 e 12 sono riportati i risultati di tale confronto per i due materiali considerati.

Risulta confermata la sensazione che il metodo indiretto è impreciso nella prima parte della prova, dove la componente di cedevolezza del sistema di carico è di entità notevole; ne deriva che i risultati dell'applicazione del metodo su materiali o a temperature alle quali il provino cede per clivaggio in campo elastico o con componente plastica ridotta, sono

scarsamente attendibili: è quanto si può osservare in relazione alle prove eseguite sull'acciaio da rotore, per il quale lo scostamento tra i valori di tenacità critica ottenuti nei due modi oscilla tra valori inferiori all'1% e valori vicini al 15% (Fig.11).

Ben diversa è la situazione sull'acciaio inossidabile, per il quale lo scostamento dei valori critici dell'integrale-J (determinati secondo norma ASTM E813) è, con una sola eccezione, inferiore al 5% (Fig.12). In termini di *J-R curves*, lo scostamento delle due curve si fa sensibile soltanto per valori di crescita di cricca superiori ad alcuni millimetri, mentre nella prima parte, laddove viene valutata la tenacità critica del campione, le due curve risultano praticamente sovrapposte (si vedano due esempi in Figg.13 e 14).

CONCLUSIONI

Sono stati descritti due metodi sviluppati al CISE per ovviare all'impossibilità di applicare un trasduttore di spostamento sulla linea di carico di un provino di tenacità statica miniaturizzato o a temperature superiori a 300 °C.

Per prove in regime fragile o misto duttile/fragile su campioni di piccole dimensioni, l'impiego del cosiddetto *clip-gage ad Ω* , saldato alla faccia anteriore del campione, consente di applicare rigorosamente le normative per il calcolo della tenacità critica sia in regime lineare elastico (K_{IC}) sia in regime di transizione (K_{IE}).

Nel caso che la temperatura di prova sia superiore a quella massima di funzionamento per un normale *clip-gage*, o nel caso che debba essere provato un campione miniaturizzato in regime elasto-plastico, il metodo indiretto, che prevede la determinazione della cedevolezza del sistema di carico mediante una prova su campione privo d'intaglio, consente il calcolo della tenacità critica con precisione dell'ordine di pochi percento.

Bibliografia

- /1/ Buchalet, C. e Mager, T.R., "Experimental Verification of Lower Bound K_{IC} Values Utilizing the Equivalent Energy Method", *Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing*, ASTM STP 536, pp.281÷295, 1973.
- /2/ Witt, F.J. e Mager, T.R., "A Procedure for Determining Bounding Values on Fracture Toughness K_{IC} at Any Temperature", *ORNL-TM-3894*, Oak Ridge National Laboratory, Ottobre 1972.
- /3/ Saxena, A. e Hudak, S.J., "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens", *International Journal of Fracture*, Vol.14, n°5, pp.453÷468, Ottobre 1978.
- /4/ Hellmann, D., Rohwerder, G. e Schwalbe, K.H., "Development of Test Setup for Measuring Deflection of Single Edge Notched Bend (SENB) Specimens", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.12, n°1, pp.62÷64, Gennaio 1984.

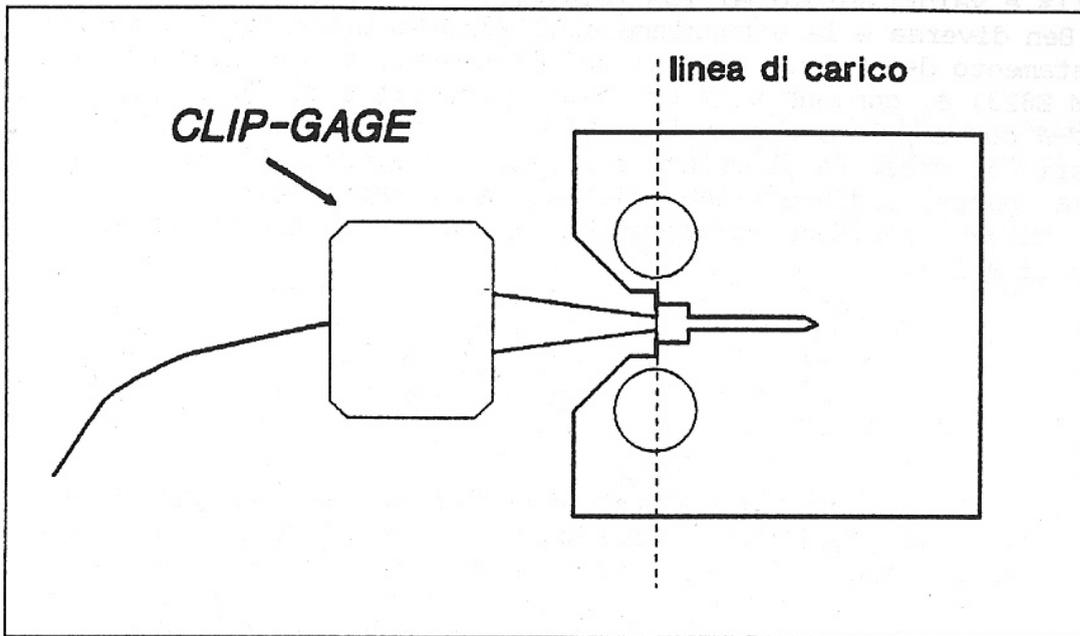


Fig.1 - *Clip-gage* convenzionale montato su un campione C(T).

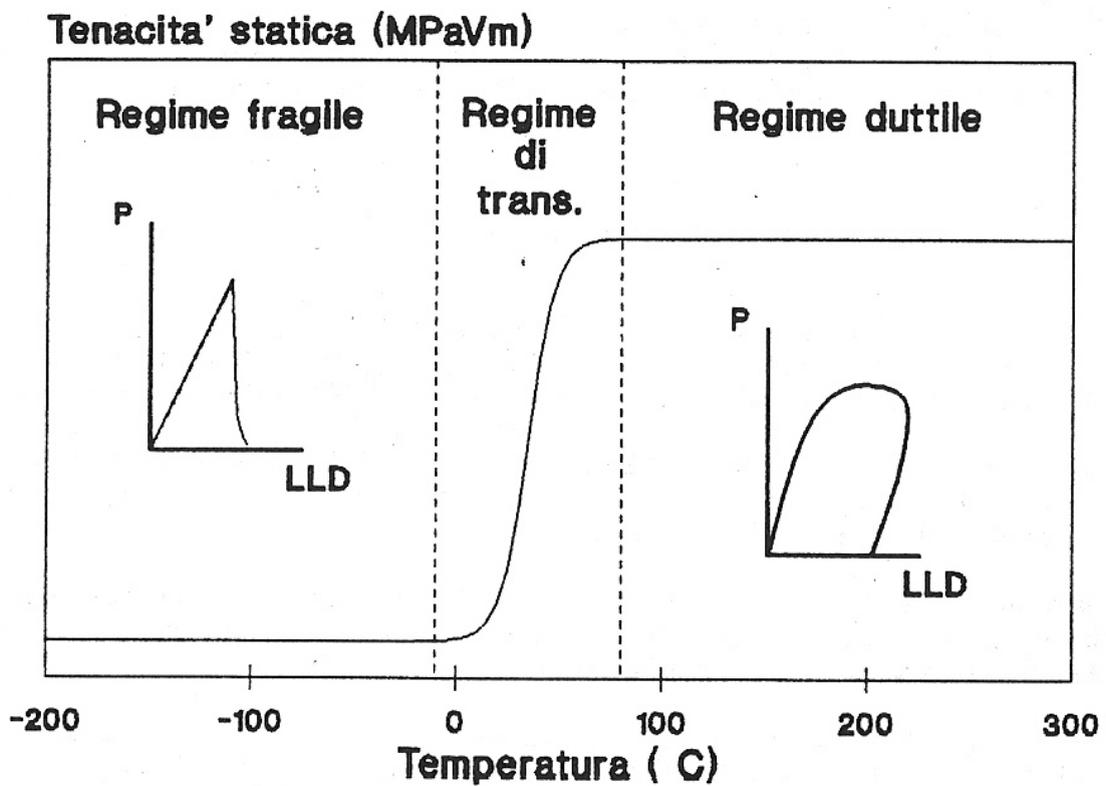


Fig.2 - Tipica curva tenacità/temperatura di un acciaio.

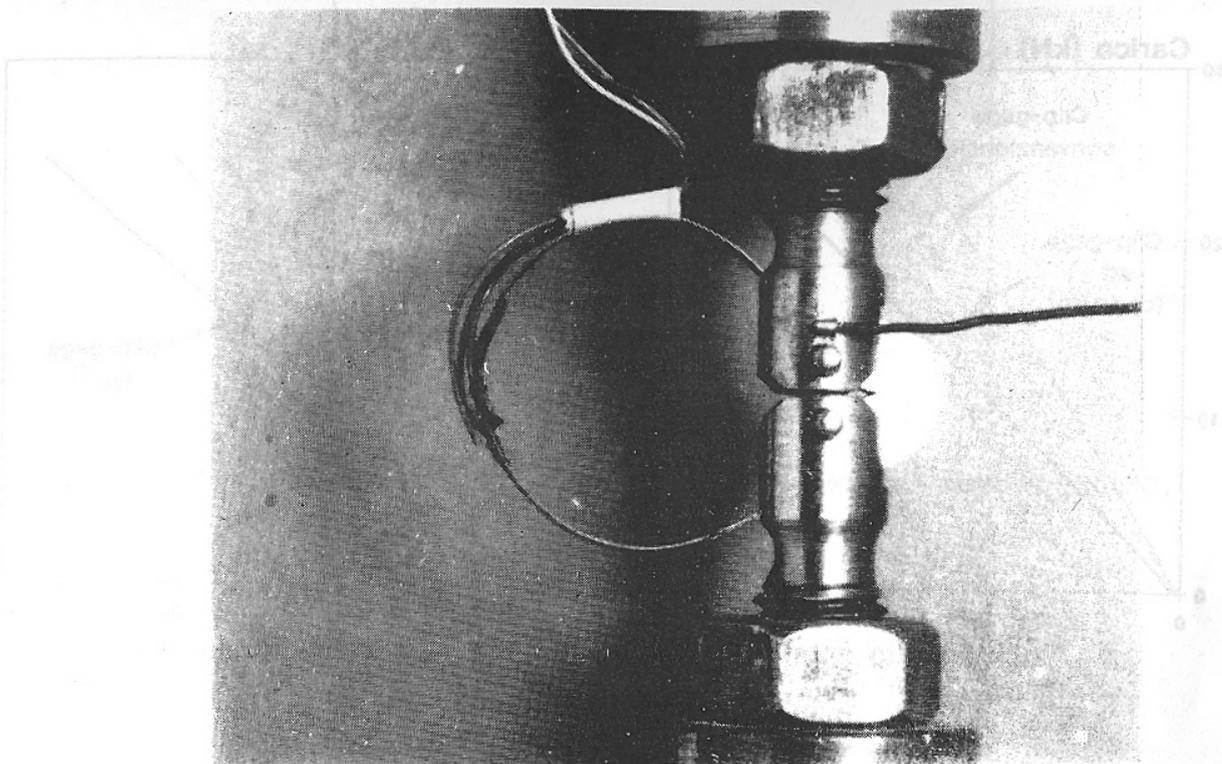


Fig.3 - *Clip-gage ad Ω* montato su un provino DC(T) miniaturizzato.

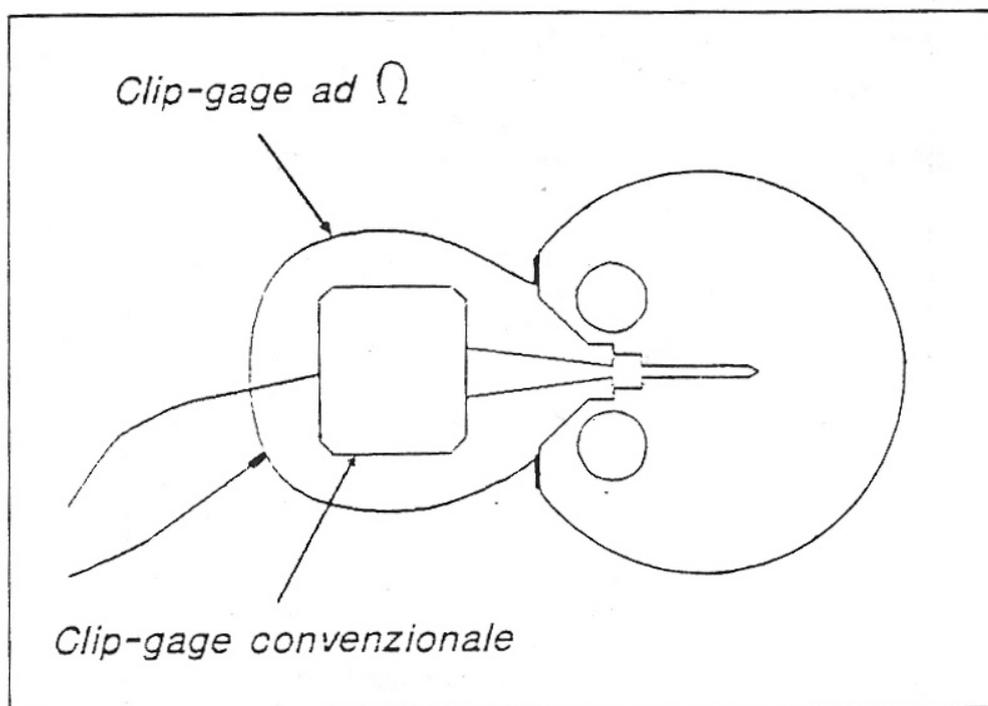


Fig.4 - Configurazione sperimentale per le prove di convalida del *clip-gage ad Ω* su campioni DC(T) da 1".

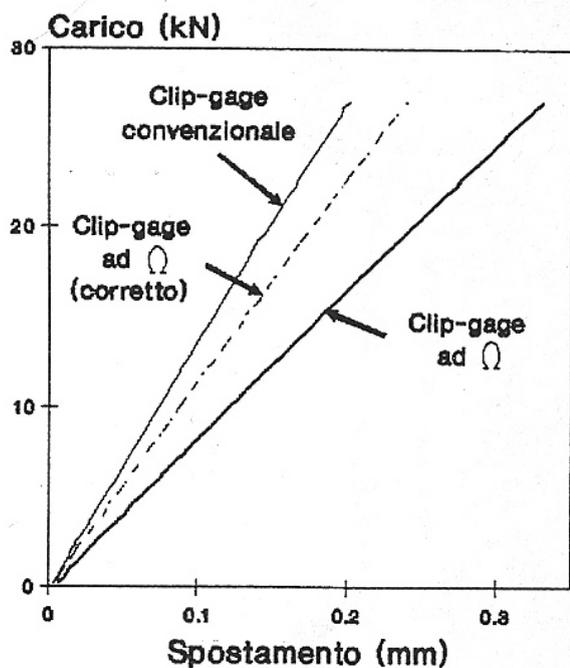


Fig.5 - Curve carico/spostamento per la prova a -20 °C.

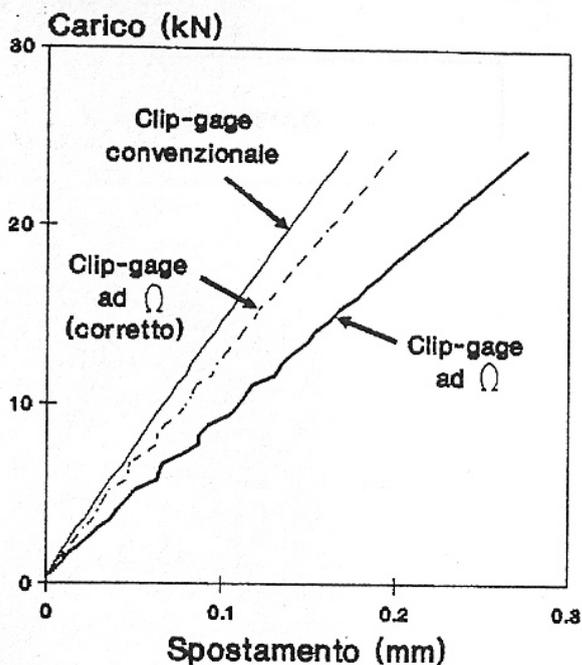


Fig.6 - Curve carico/spostamento per la prova a 0 °C.

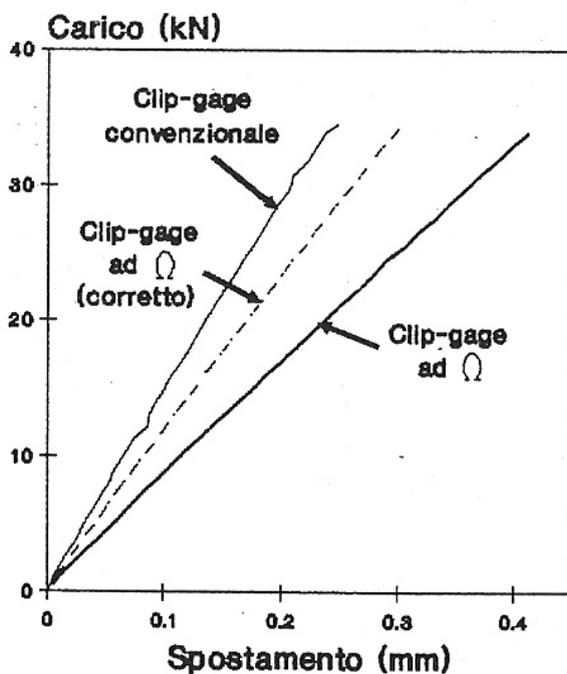


Fig.7 - Curve carico/spostamento per la prova a 25 °C.

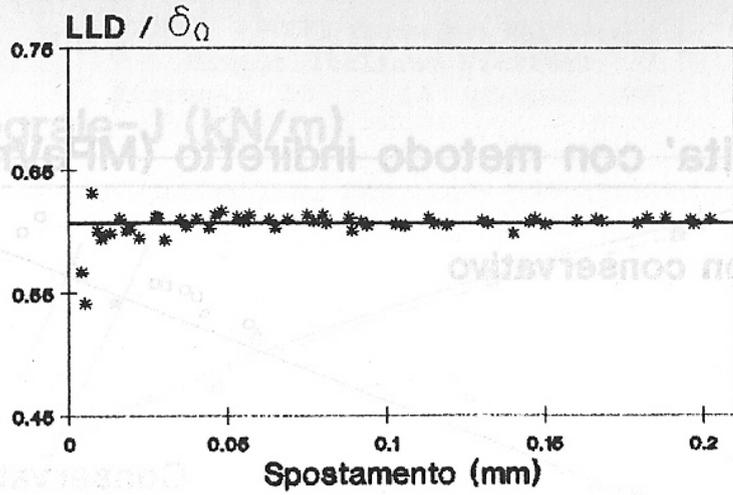


Fig.8 - Andamento del rapporto LLD/δ_0 per la prova a $-20\text{ }^\circ\text{C}$.

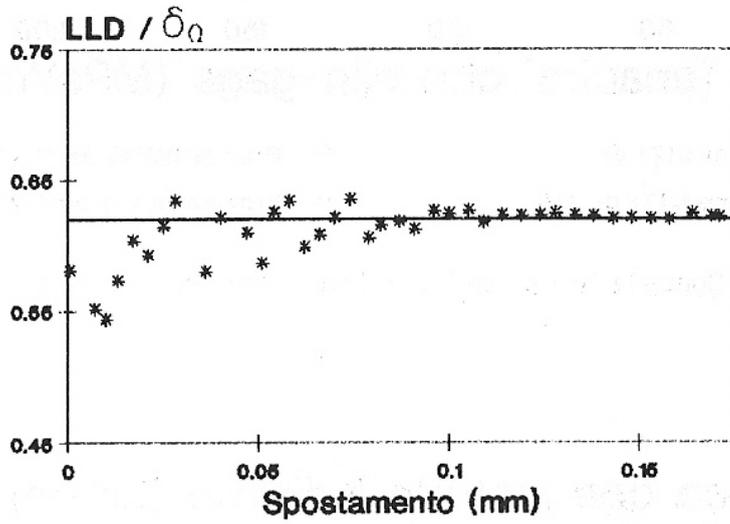


Fig.9 - Andamento del rapporto LLD/δ_0 per la prova a $0\text{ }^\circ\text{C}$.

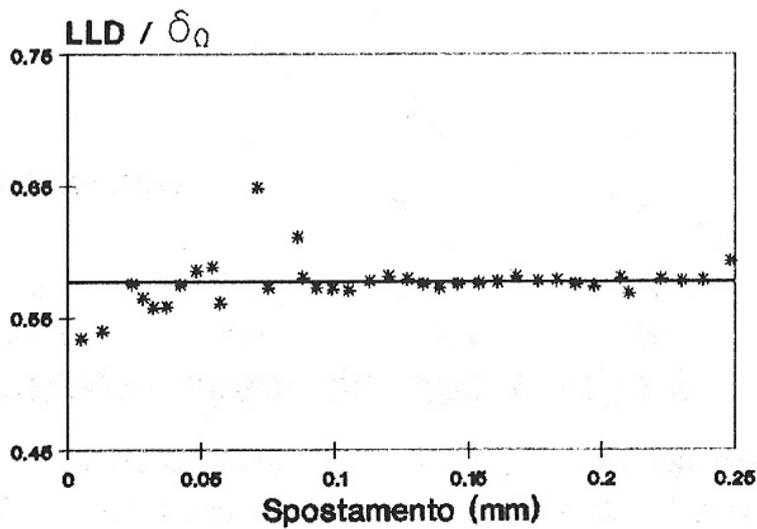


Fig.10 - Andamento del rapporto LLD/δ_0 per la prova a $25\text{ }^\circ\text{C}$.

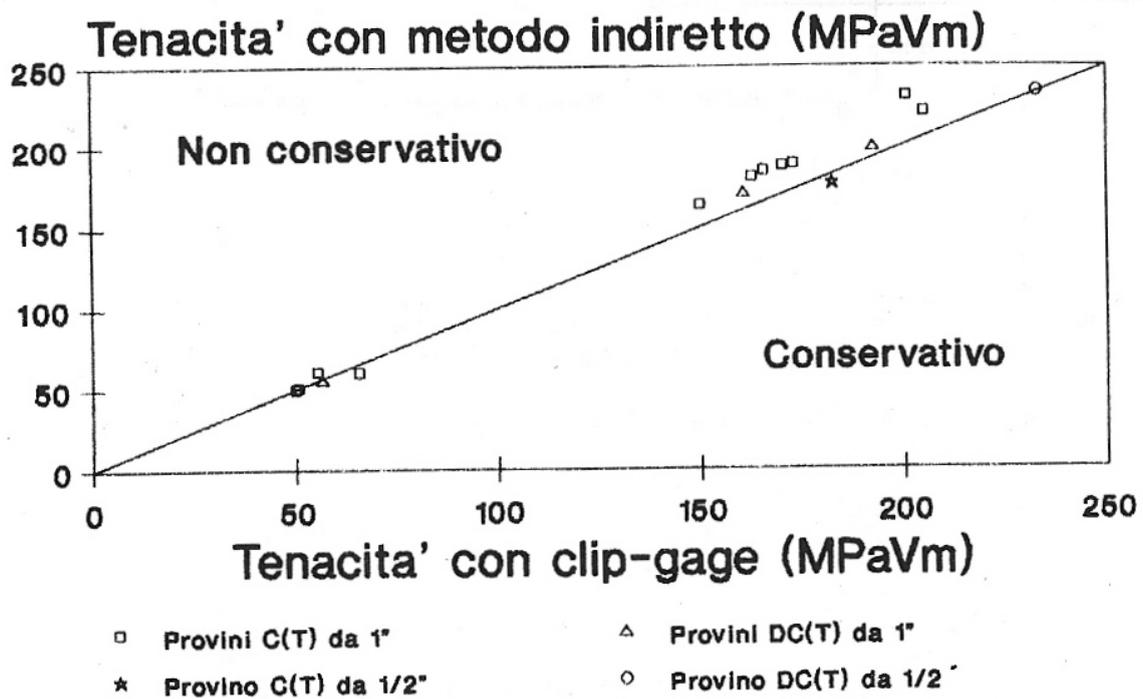


Fig.11 - Convalida del metodo indiretto sull'acciaio da rotore.

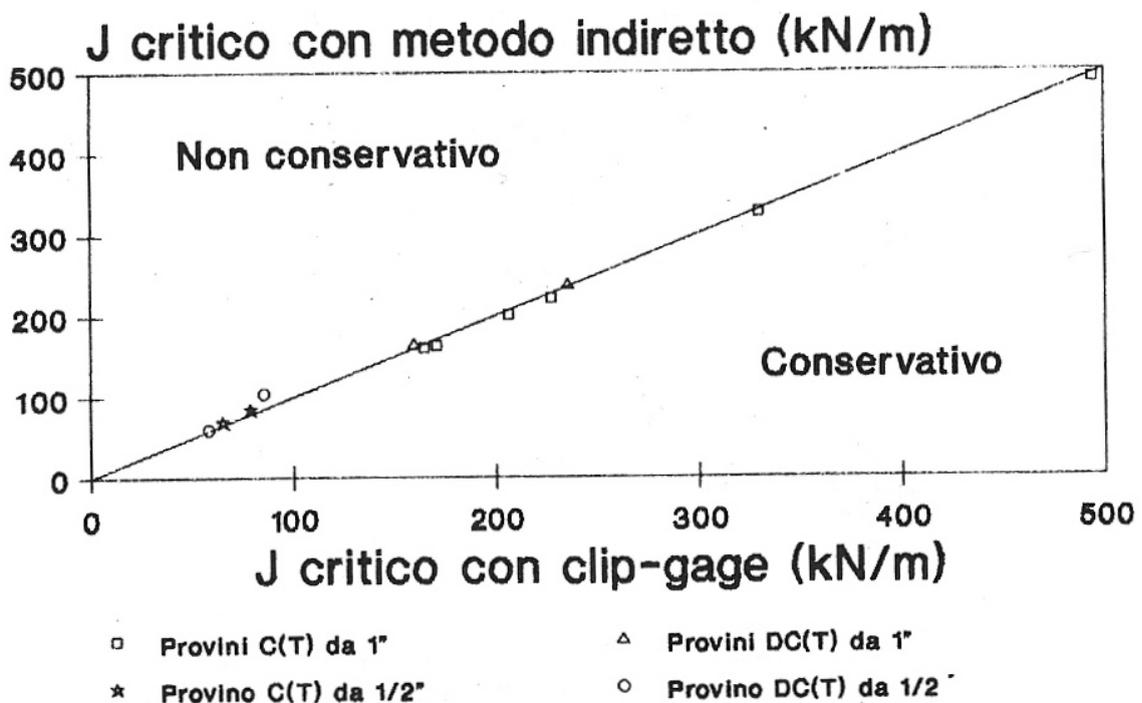


Fig.12 - Convalida del metodo indiretto sull'acciaio inossidabile.

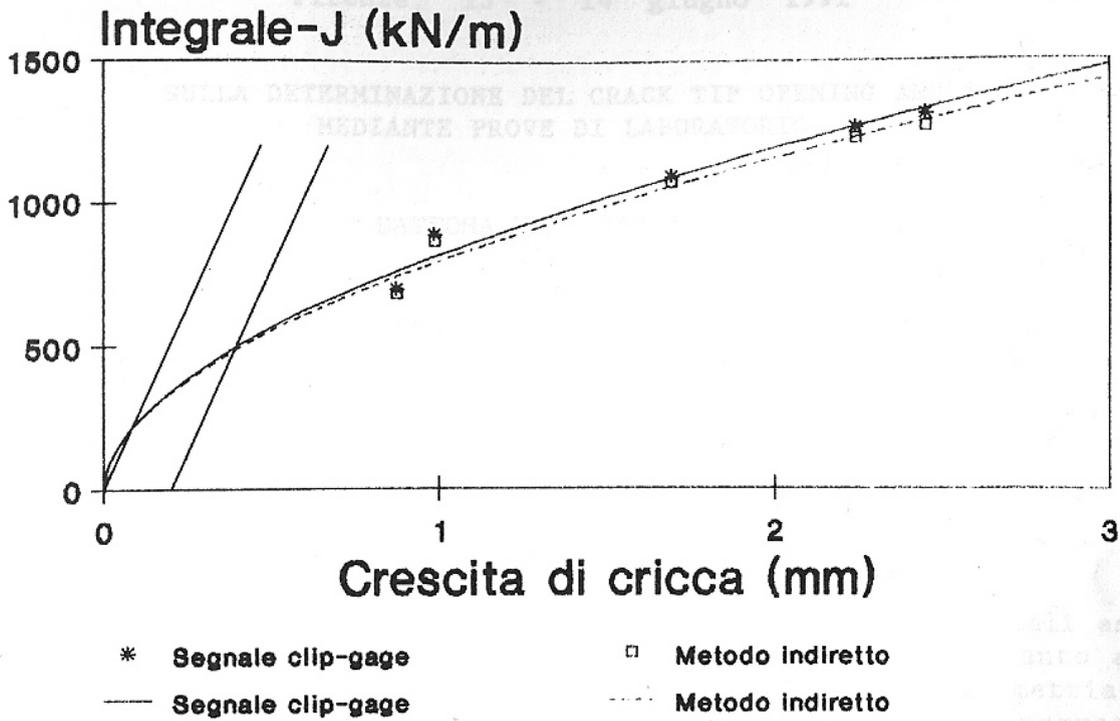


Fig.13 - J-R curves ottenute a 25 °C sull'acciaio inossidabile.

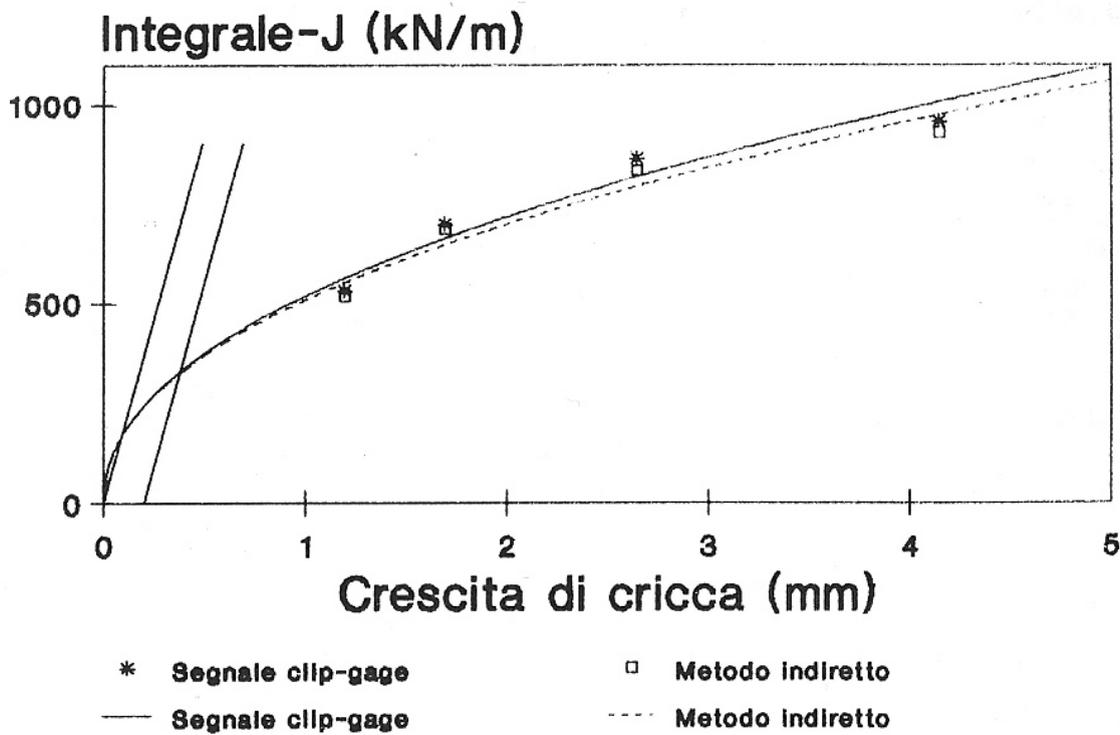


Fig.14 - J-R curves ottenute a 250 °C sull'acciaio inossidabile.