

**IGF 12 -XII Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Parma, 12-13 giugno 1996**

**MISURA DI TENACITÀ ALLA FRATTURA DUTTILE DI ACCIAI
MEDIANTE PROVE AD IMPATTO STRUMENTATE**

R.Roberti, G.Straffelini**, V.Fontanari***

* Dipartimento di Meccanica
Università degli Studi di Brescia
Via Branze, 38 - 25123 Brescia

** Dipartimento di Ingegneria dei Materiali
Università degli Studi di Trento
38050 Mesiano di Povo (Tn)

Parole chiave: Resilienza strumentata, Integrale J, Curva J-R

Sommario

Le prove ad impatto mediante pendolo strumentato su provini tipo Charpy V, intagliati o contenenti una precricca di fatica, offrono la possibilità di registrare la forza applicata e lo spostamento del punto di applicazione del carico e di conseguenza si prestano ad una analisi dei risultati analoga a quella prevista nelle normative delle prove di tenacità alla frattura, purchè si possa avere indicazione del grado di avanzamento della frattura nel corso della prova medesima. Nel presente lavoro vengono illustrati i risultati di alcune serie di prove eseguite su differenti tipi di acciaio, condotte limitando in alcuni casi l'energia disponibile all'impatto in modo da evitare la separazione del provino in due metà, così da poter ottenere le curve di resistenza alla propagazione di frattura J-R. L'analisi dei risultati ottenuti ha consentito di mettere in luce la possibilità di ottenere la curva J-R anche dalla prova su un singolo campione.

1. Introduzione

La tenacità alla frattura degli acciai è sempre più frequentemente indicata nei capitoli di accettazione delle forniture di prodotti siderurgici o di manufatti strutturali; problemi di costo, di disponibilità di materiale, di difficoltà di effettuazione delle prove possono talvolta precludere la possibilità di esecuzione di prove di tenacità alla frattura per la

misura di parametri quali K_{IC} , J_{IC} , curva J-R, COD di innesco o a carico massimo, indirizzando la scelta su prove più semplici ed economiche quali quella di impatto su provini intagliati.

La possibilità di registrare la forza applicata e lo spostamento del punto di applicazione del carico mediante l'impiego di pendoli strumentati, così come l'utilizzo di campioni contenenti una precricca di fatica al posto dell'intaglio a raggio di fondo finito, consentono di ampliare le indicazioni ottenibili da una prova di impatto.

Nel lavoro vengono presentati i risultati di alcune serie di prove eseguite su differenti tipi di acciaio, condotte limitando in alcuni casi l'energia disponibile all'impatto in modo da evitare la separazione del provino in due metà; in tal modo si sono potute ottenere le curve di resistenza alla propagazione di frattura J- Δa con un metodo multi campione.. Si sono anche analizzati i contributi delle varie fasi individuabili nella separazione del provino in due metà alla dissipazione di energia e si è potuto derivare un metodo semplificato per l'analisi del comportamento a frattura duttile degli acciai nelle prove ad impatto strumentate.

2. Materiali e metodi sperimentali

I campioni per le prove sono stati fabbricati con i seguenti acciai: a) un acciaio al C-Mn per lamiera (acciaio C); b) un acciaio per bonifica al Cr (acciaio R); c) un acciaio per bonifica al MnB (acciaio S); d) un acciaio per bonifica al Cr-Mo-V (acciaio T).

I provini di acciaio C sono stati ricavati in direzione trasversale da una lamiera di 25 mm di spessore allo stato normalizzato ($R_s = 370 \text{ N/mm}^2$ e $R_s/R = 0,7$); i campioni di acciaio R ed S da tondi di 15 mm di diametro, bonificati scegliendo la temperatura di rinvenimento in modo da avere una resistenza a snervamento $R_{p0,2}$ di circa 1040 N/mm^2 ed un rapporto $R_{p0,2}/R$ pari a 0,95, mentre i campioni di acciaio T sono stati ottenuti in direzione trasversale da un tubo di grosso spessore bonificato, avente $R_{p0,2} = 800 \text{ N/mm}^2$ ed un rapporto $R_{p0,2}/R = 0,8$.

Tutti i campioni sono stati precriccati in modo da avere una lunghezza di cricca a pari a circa metà altezza W ($a/W \cong 0,5$). Nel caso degli acciai R ed S si sono anche utilizzati campioni intagliati con intaglio a V e raggio di fondo intaglio di 0,25 mm.

Le prove sono state condotte a temperatura ambiente; in tale condizione tutti gli acciai hanno presentato un comportamento a frattura completamente duttile.

Per le prove di impatto si è fatto uso di un pendolo strumentato Wolpert con massima energia disponibile di 300 J. Alcuni campioni sono stati sottoposti a prova rendendo disponibile all'impatto una energia inferiore a quella necessaria per una loro completa rottura in due metà. Pur avendo registrato anche per tali prove la variazione del carico applicato in funzione del tempo di prova e dello spostamento del punto di applicazione del carico, i valori di integrale J sono stati calcolati a partire dall'energia disponibile scelta all'inizio della prova. Tali campioni sono stati quindi portati a rottura in maniera

fragile così da poter misurare l'entità dell'avanzamento della frattura avvenuto durante l'impatto.

Non essendo disponibili normative di riferimento per l'analisi dei risultati delle prove ad impatto su provini intagliati o precriccati si è fatto ricorso, ove possibile, a quanto indicato nella procedura ESIS (1).

3. Risultati e discussione

Le curve J-R ottenute con il metodo multi campione sono illustrate nelle Figg. 1 - 6. In tutte le figure le curve a più basso livello di J si riferiscono a valori di integrale J corretti in funzione dell'avanzamento della cricca. Per i campioni portati completamente a rottura si è adottato come avanzamento della frattura non tanto il legamento residuo iniziale bensì il valore misurato fra la precricca iniziale e la zona che nella propagazione della frattura mostra un modo di separazione, relativamente agli ultimi decimi di millimetro, completamente differente. Nella Fig. 1 inoltre sono anche riportate le curve J-R ottenute da prove quasi statiche; la resistenza a frattura è risultata maggiore nel caso delle prove dinamiche e sono in corso verifiche sulle motivazioni di tale risultato; analoghe osservazioni sono comunque già riportate in letteratura (2) e sono state attribuite ad un innesco di cricche multiple dalla precricca iniziale prima che si verifichi la propagazione di una sola di esse.

L'ottenimento di una curva J-R di resistenza alla frattura duttile dinamica facendo ricorso ad una procedura multi campione non presenta particolari difficoltà; infatti, dopo aver condotto una prova con energia disponibile all'impatto $E_0 > E_t$, dove E_t è l'energia assorbita nella frattura del campione, al fine di non avere influenze della riduzione di velocità della mazza battente sulla curva registrata (3), si possono scegliere le energie da rendere disponibili nelle prove a bassa energia di impatto così da avere differenti livelli di avanzamento della frattura. L'energia minima da rendere disponibile può essere semplicemente determinata facendo riferimento all'energia assorbita in corrispondenza del carico massimo rilevato nel corso della prova iniziale, in corrispondenza del quale si è lungamente ritenuto avvenisse l'innesco della frattura (4).

Numerosi ricercatori si sono tuttavia posti il problema di riuscire ad individuare il punto di innesco della frattura duttile facendo ricorso ad un solo campione, dato che l'impiego di numerosi campioni come previsto nella procedura multi provino può spesso risultare eccessivamente onerosa. Kobayashi et al. hanno proposto una metodologia che si basa sulla variazione nel corso della prova della cedevolezza, intesa come pendenza della retta passante per il punto iniziale della prova ed il punto i-esimo considerato. Tale procedura, tuttavia, applicata alle prove condotte nel presente lavoro non ha fornito indicazioni sicure circa il punto di inizio della propagazione ed è apparso risultare fortemente influenzato dalla plasticizzazione del legamento del campione.

Nell'ambito delle prove quasi statiche si sono di recente sviluppati numerosi metodi (5-7) che consentono di avere una indicazione dell'avanzamento della frattura facendo ricorso ad un solo campione e senza dover fare uso di misure particolari quali quella della caduta di potenziale o della variazione della cedevolezza delle curva di scarico parziale del

campione, misure che per altro non potrebbero essere effettuate nel corso di prove ad impatto.

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 è stato proposto da uno degli Autori (8) sempre partendo dalla analisi delle curve carico-spostamento registrate nel corso delle prove con il metodo della "key curve" (5).

Con tale metodo durante la propagazione della frattura il carico P_i registrato nel corso della prova è correlato con quello che si sarebbe registrato nel caso di cricca stazionaria P_{csi} dall'equazione

$$P_{csi} = P_i b_0^2/b_i^2$$

nella quale b_i è il legamento istantaneo del campione e b_0 quello iniziale. Nel caso la curva P_{csi} -spostamento del punto di applicazione del carico 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,

$$b_i = b_0 \sqrt{P_i/P_{csf}}$$

Dalle verifiche effettuate (8) è risultato che calcolando il punto P_{csf} relativamente al punto finale al quale è stata interrotta la prova, partendo dal valore di legamento finale b_f misurato sul campione, la curva P_{csi} -spostamento del punto di applicazione del carico è semplicemente rappresentata dalla tangente al tracciato registrato nella prova condotta a partire dal punto P_{csf} .

Come è possibile osservare dalle Figg. 7 -12 i punti normalizzati P_{csf} calcolati per ognuno dei campioni si allineano in tutti i casi su una retta (si deve escludere da tali punti quello finale relativo ai campioni portati a rottura completa, la cui posizione è molto incerta data la difficoltà di misura del legamento residuo finale costituito dalla zona con modalità di frattura differente).

Nel caso dei campioni precriccati tale retta è inoltre tangente alla curva di prova e pertanto il metodo semplificato (8) può essere impiegato per risalire alle dimensioni istantanee della cricca nel corso della prova ad impatto così che risulta possibile determinare la curva J-R con due soli campioni, di cui uno portato a rottura e l'altro sottoposto a prova con basso livello di energia, scelto all'incirca in corrispondenza del flesso individuabile nella parte discendente della curva di prova.

Nel caso dei campioni con intaglio a V, al contrario, pur essendo i punti normalizzati, almeno fino al punto di flesso, interpolabili mediante una retta, quest'ultima tuttavia non risulta tangente alla curva di prova ma interseca la curva medesima in corrispondenza del carico massimo. Il punto di innesco è quindi effettivamente situato in corrispondenza del

carico massimo per questi provini intagliati ed è in ogni caso preceduto da una ampia plasticizzazione del legamento del provino.

4. Conclusioni

Si sono eseguite alcune serie di prove di resilienza strumentata impiegando campioni precriccati e intagliati fabbricati con differenti tipi di acciaio; in alcuni casi le prove sono state condotte limitando l'energia disponibile all'impatto in modo da evitare la separazione del provino in due metà ed in tal modo si sono potute ottenere le curve di resistenza alla propagazione di frattura $J-\Delta a$ con un metodo multi campione. I risultati hanno consentito di verificare che, almeno per la prima parte della propagazione della frattura, la curva che descrive il comportamento di un provino in cui la cricca rimanga stazionaria è data da una retta tangente alla curva di prova ed è calcolabile normalizzando il carico finale di una prova a bassa energia di impatto in funzione del legamento residuo e del legamento finale del campione considerato. Dalla retta tangente così ottenuta è quindi possibile risalire alle dimensioni della cricca durante la prova stessa ed è di conseguenza calcolabile la curva di resistenza alla frattura $J-R$.

Bibliografia

- 1 - ESIS P1-92D (1992), *ESIS Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials*. European Structural Integrity Society.
- 2 - J.W. Shekherd, M. Kangilaski, A.A. Bauer, "Impact properties of shock-strengthened type 316 stainless steel", ASTM STP 563, 1974, 118-132
- 3 - T. Kobayashi, I. Yamamoto, M. Niinomi, "On the accuracy of measurement of dynamic elastic-plastic fracture toughness parameters by instrumented Charpy V test", Eng. Fract. Mech., 26, 1, 1987, 83-94
- 4 - W. Bohme, W. Schmitt, "On the ductile crack initiation and propagation behaviour of a pressure vessel steel under impact loading", ESIS/EGF9, 1991, 681-692
- 5 - 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.
- 6 - 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.
- 7 - 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.
- 8 - R. Roberti, Sh. Basha, "Un nuovo metodo semplificato per determinare la curva J-R da carico e spostamento registrati in una prova su un singolo campione", Atti IGF XI, Brescia 4-6 luglio 1995, 129-138

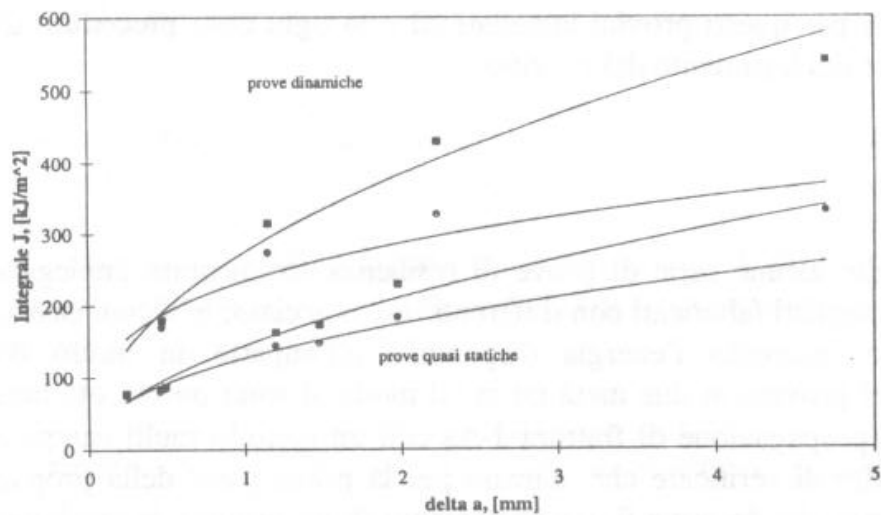


Fig. 1 - Curve J-R dinamica e statica per campioni precriccati di acciaio C

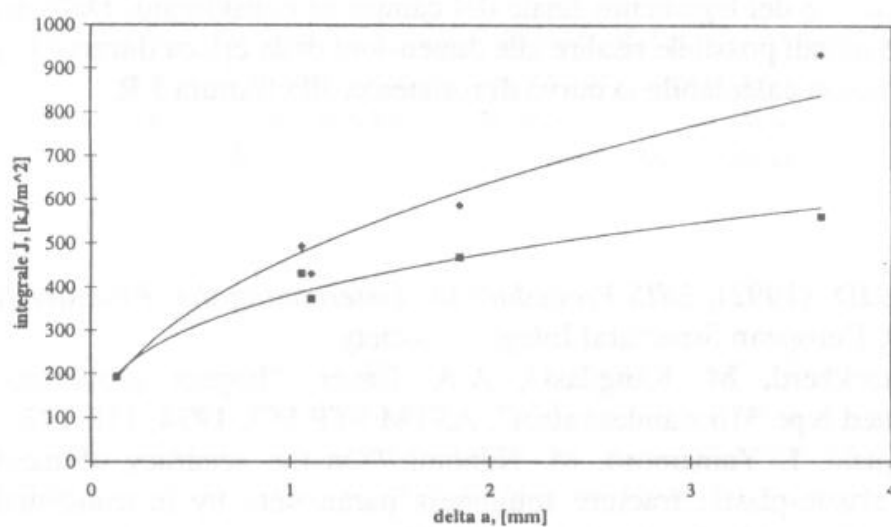


Fig. 2 - Curve J-R dinamica per campioni precriccati di acciaio R

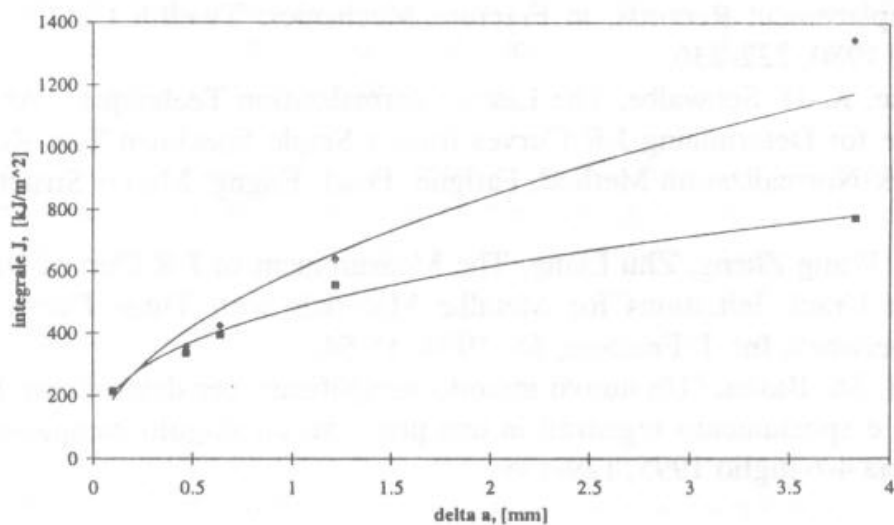


Fig. 3 - Curve J-R dinamica per campioni precriccati di acciaio S

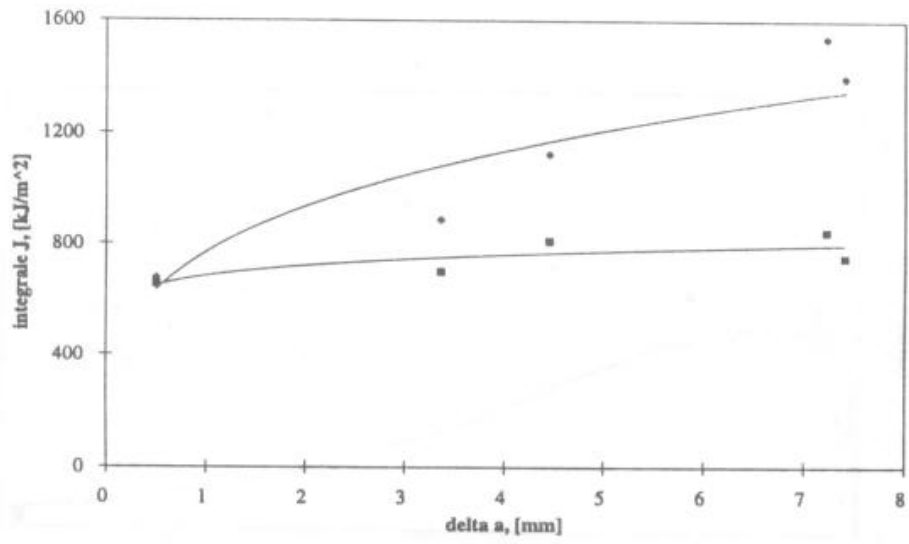


Fig. 4 - Curve J-R dinamica per campioni intagliati di acciaio R

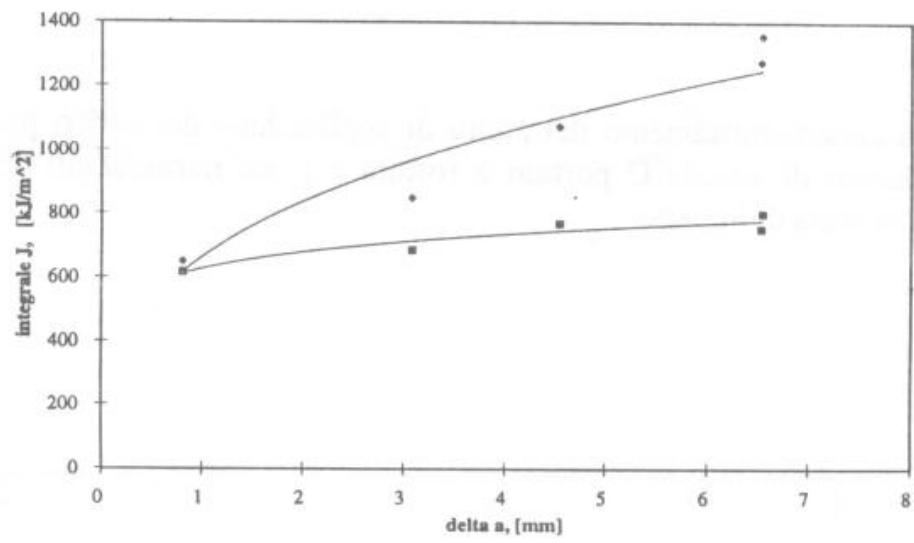


Fig. 5 - Curve J-R dinamica per campioni intagliati di acciaio S

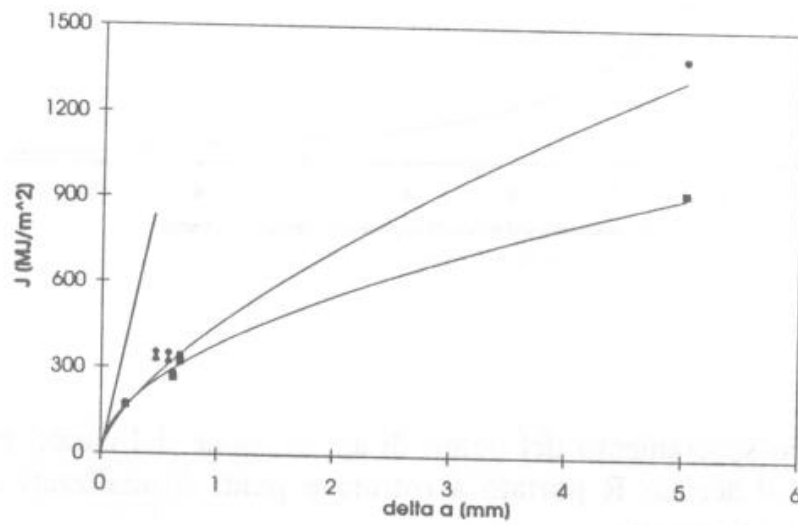


Fig. 6 - Curve J-R dinamica per campioni precriccati di acciaio T

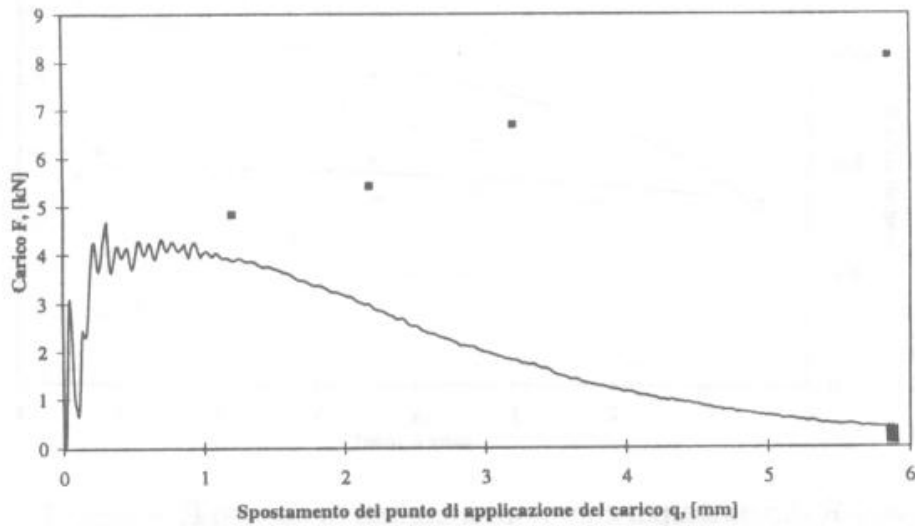


Fig. 7 - Curva carico-spostamento del punto di applicazione del carico per il provino precriccato di acciaio C portato a rottura e punti normalizzati delle prove a bassa energia di impatto

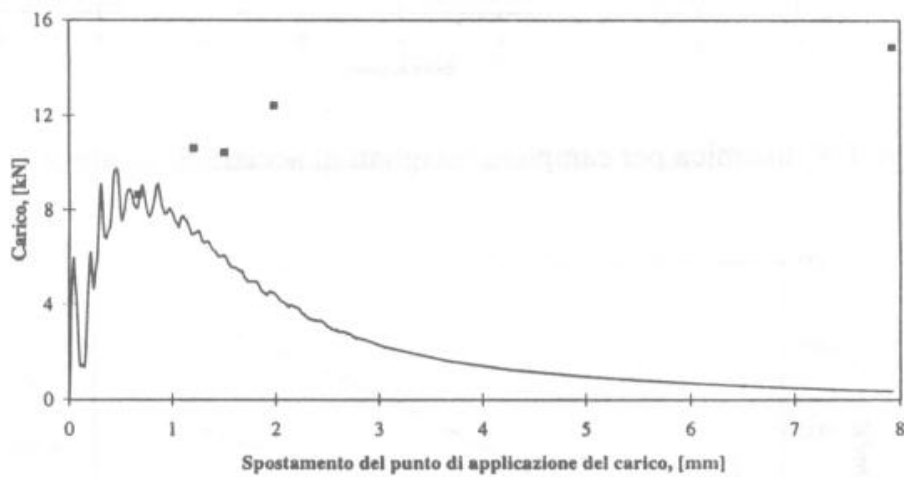


Fig. 8 - Curva carico-spostamento del punto di applicazione del carico per il provino precriccato di acciaio R portato a rottura e punti normalizzati delle prove a bassa energia di impatto

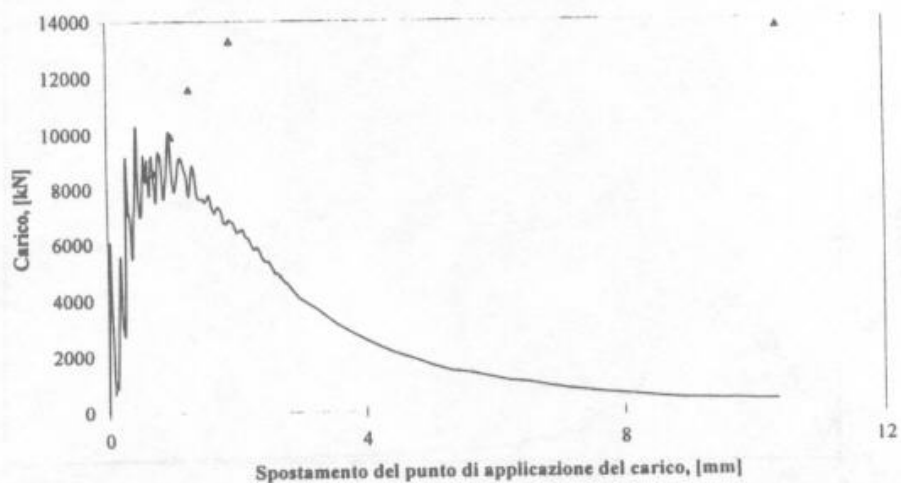


Fig. 9 - Curva carico-spostamento del punto di applicazione del carico per il provino precriccato di acciaio S portato a rottura e punti normalizzati delle prove a bassa energia di impatto

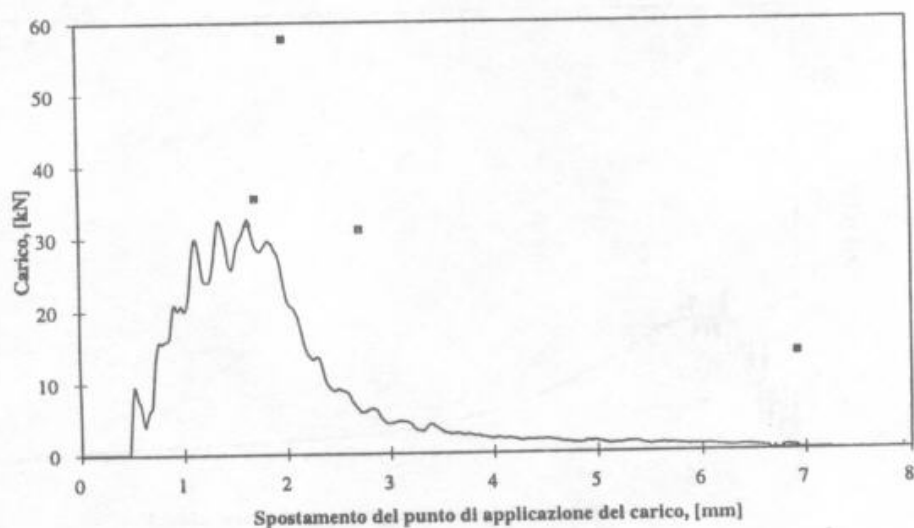


Fig. 10 - Curva carico-spostamento del punto di applicazione del carico per il provino intagliato di acciaio R portato a rottura e punti normalizzati delle prove a bassa energia di impatto

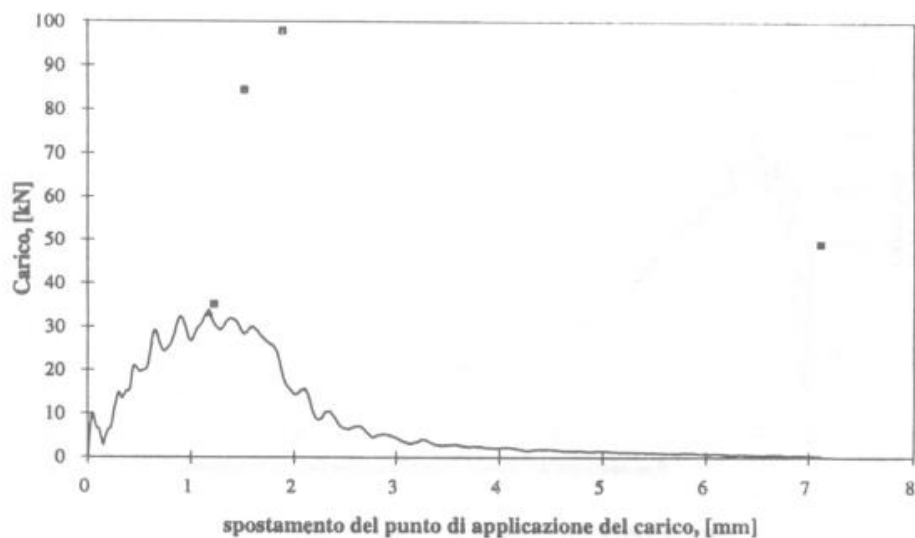


Fig. 11 - Curva carico-spostamento del punto di applicazione del carico per il provino intagliato di acciaio S portato a rottura e punti normalizzati delle prove a bassa energia di impatto

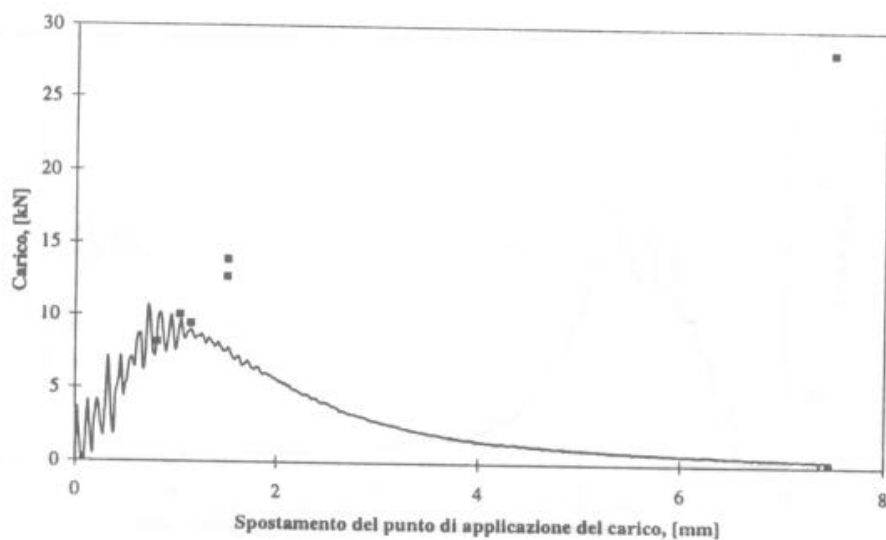


Fig. 12 - Curva carico-spostamento del punto di applicazione del carico per il provino precriccato di acciaio T portato a rottura e punti normalizzati delle prove a bassa energia di impatto