

**GRUPPO ITALIANO FRATTURA (IGF)**

**VII Convegno Nazionale**

**Firenze, 13 e 14 giugno 1991**

**SIMULAZIONE NUMERICO-SPERIMENTALE DEI FENOMENI DI  
PROPAGAZIONE E ARRESTO DI UNA FRATTURA NELLE LEGHE LEGGERE  
DI IMPIEGO AERONAUTICO.**

Marchetti M.0, Milella P.P.00, Pini A.00, Torelli A.00  
0 Dipartimento Aerospaziale, Univ. "La Sapienza", Roma  
00 ENEA DISP ANT-TECNO, Roma

**1) INTRODUZIONE**

Il presente lavoro costituisce la prima parte di una più ampia ricerca teorico sperimentale sulla caratterizzazione delle proprietà dinamiche a frattura di alcune leghe leggere di uso aeronautico.

In particolare le leghe studiate sono le due più tradizionali in questo campo, la 7075-T6 e la 2024-T351.

Sia la parte numerica che quella sperimentale sono state condotte presso l'ENEA: in particolare, presso la divisione ANT-TECNO dell'ENEA DISP-Roma è stata svolta l'indagine numerica mentre l'intera matrice di prove sperimentali è stata realizzata presso i laboratori di prove meccaniche dell'ENEA INN-NMI Casaccia.

Negli ultimi dieci anni grande impulso hanno ricevuto le ricerche riguardante il comportamento dinamico delle fratture.

Il principio che sorregge questi studi è la possibilità che un difetto, dopo essersi avviato, possa arrestarsi senza pregiudicare l'integrità della struttura.

Nel presente lavoro una particolare attenzione è stata rivolta alla misurazione sperimentale della tenacità all'arresto  $K_{Ia}$  delle due leghe di alluminio facendo uso sia di provini standard Compact Crack-Arrest (CCA) che di nuovi provini rastremati studiati appositamente per permettere il mantenimento di un  $K_I$  costante lungo un tratto sufficientemente esteso al fine di consentire propagazioni significative e ben misurabili della cricca prima del suo arresto finale.

In questo lavoro si è inteso stabilire inoltre l'influenza che la temperatura ha sui fenomeni di propagazione ed arresto estendendo l'indagine, in particolare, alle basse temperature.

## 2) PROCEDURA DI PROVA E PROVE PRELIMINARI

Il problema più significativo nell'uso di un provino quale il Compact Crack Arrest (CCA) per misurare una propagazione instabile e quindi un arresto di cricca è che, in generale, i due fenomeni non sono tra loro compatibili.

Nello studio degli acciai il problema è stato in parte risolto attraverso l'uso di un inserto fragile di fondo intaglio ottenuto o attraverso un deposito di saldatura (metodo proposto dall'ASTM) o con un infragilimento locale per precipitazione mediante scarica elettrica o induzione (metodo adottato dall'ENEA).

Per le leghe di alluminio tali metodi di infragilimento non sono altrettanto agevoli o possibili.

Per di più le leghe di alluminio presentano anche un altro problema strettamente legato alla loro tenacità  $K_{Ic}$  che non supera valori di 40-45  $MPa\sqrt{m}$ .

Infatti poiché non è realistico pensare a valori di tenacità all'arresto  $K_{Ia}$  inferiori a 30  $MPa\sqrt{m}$ , avere una bassa tenacità  $K_{Ic}$  iniziale significa esaurire l'evento iniziatazione-arresto entro una escursione di tenacità di soli 10-20  $MPa\sqrt{m}$ .

Con un provino CCA, che presenta una forte gradiente di KI, un tale evento si svilupperebbe, allora, attraverso un salto  $\Delta a$  della cricca di soli pochi millimetri.

Come primo passo nella ricerca si è voluto, quindi, studiare proprio la rispondenza del provino CCA alle esigenze di misurazione delle velocità di propagazione delle fratture e delle tenacità all'arresto delle leghe di alluminio.

Il provino CCA usato nelle prove preliminari e le procedure di prova sono quelle raccomandate dalla norma ASTM E 1221-88 (1) ed illustrato in Fig.1.

Esso ha una lunghezza totale  $L'=L+W$ , larghezza  $2H$  e spessore  $B$ , non trascurabile rispetto alle altre dimensioni; la lunghezza utile del provino è  $W$ , distanza dal centro del foro di carico all'estremità opposta.

Per aumentare il grado di triassialità del campo delle tensioni e guidare il percorso della cricca vengono realizzate, nel piano di propagazione del difetto, due scanalature, una per ciascuna faccia orizzontale, dette "side grooves", che riducono localmente lo spessore del provino del 25%.

Il provino viene appoggiato su una piastra orizzontale ed è caricato attraverso il sistema costituito dal cuneo e dalle bussole, Fig.2.

Il cuneo, guidato dalla macchina oleodinamica di prova, penetra verticalmente e trasmette la forza  $P$  alle due bussole, che a loro volta esercitano una pressione lungo la superficie di accoppiamento del provino.

La forza  $P$  è nota attraverso una cella di carico collegata alla macchina di prova. Un registratore, ad esempio di tipo XY, traccia il diagramma di prova che ha in ascisse l'apertura  $\delta$  del provino ed in ordinata il carico  $P$ .

Per ridurre le dissipazioni dovute all'attrito, le superfici di contatto tra cuneo e bussole sono lubrificate con grasso

per alta pressione o tramite interposizione di teflon in strati sottili.

L'apertura del provino viene misurata con un trasduttore estensimetrico del tipo a lamelle montato alla bocca dello stesso a distanza L dalla linea di carico (Fig.2).

Essendo la prova condotta in controllo di spostamento occorre impostare la velocità di discesa del cuneo.

La tecnica usata per caricare il provino è di tipo ciclico allo scopo di eliminare ad ogni ciclo la possibile deformazione plastica residua ottenuta durante la penetrazione del cuneo nei cicli precedenti permettendo l'uso di concetti a MFLE quali il KIa.

Dopo l'ultimo ciclo di carico in cui si verifica la propagazione instabile ed il successivo arresto della cricca, il provino viene riscaldato in modo che l'ossidazione delle superfici di frattura marchi il punto di massima propagazione della cricca (heat tinting).

Il provino viene quindi rotto in due parti dopo essere stato immerso in azoto liquido per infragilirlo e si misura la lunghezza finale  $a_a$  della cricca, mentre dal diagramma di prova si ricava l'apertura  $\delta_a$  del provino all'arresto della cricca.

Si ottiene quindi il valore della tenacità all'arresto KIa dalla relazione:

$$K_{Ia} = \delta_a E \sqrt{\frac{B}{B_n W}} f\left(\frac{a_a}{W}\right) \quad (1)$$

in cui E è il modulo di Young del materiale e f(x) è la funzione di calibrazione del provino dipendente dalla sua geometria.

Per il provino CCA si ha:

$$f(x) = \frac{2.24(1.72 - 0.9x + x^2)\sqrt{1-x}}{9.85 - 0.17x + 11x^2} \quad (2)$$

in cui  $x=a/W$ .

Le prove preliminari hanno dimostrato che è possibile ottenere inneschi di fratture con provini di alluminio particolarmente fragili come il 7075-T6 ma hanno anche evidenziato, come ci si aspettava, propagazioni di entità poco significativa (solo 2 mm nel primo provino).

In sintesi le prove sperimentali hanno evidenziato che:

a) è possibile ottenere una propagazione instabile mediante una prova in cui si faccia ricorso a provini di alluminio

7075-T6 caricati a cuneo;

b) il diagramma  $P-\delta$  della prova ha un andamento sensibilmente lineare senza significativi fenomeni di plasticizzazione del fondo intaglio in tutti i cicli, compreso quello di rottura;

c) per ottenere una propagazione significativa è opportuno individuare una geometria del provino la cui funzione di calibrazione garantisca una diminuzione del  $K$  con l'avanzamento della cricca più lenta rispetto a quella del provino CCA.

### 3) SVILUPPO DEL PROVINO WLTC A

La determinazione di un nuovo provino di crack arrest che garantisca una caduta più lenta o meglio ancora una zona di relativa costanza del  $K$  è stata effettuata tramite l'uso del codice agli elementi finiti "SPACCA" sviluppato tra il 1983-1986 nell'ambito di un contratto ENEA-CISE (2).

Questo codice è espressamente dedicato allo studio della propagazione ed arresto di cricche in geometrie piane.

Per verificare l'affidabilità dei risultati ottenuti, il codice Spacca è stato inizialmente applicato al provino CCA la cui funzione di calibrazione è nota (eq.2).

La mesh utilizzata è quella di Fig.3. In Fig. 4 è riportato un confronto tra le funzioni di calibrazione di letteratura e calcolata: si noti l'accordo tra le due curve a testimonianza di una corretta applicazione del codice.

Successivamente sono state studiate 4 diverse geometrie alternative (Fig. 5). La Fig. 6 mostra i risultati ottenuti in termini di  $KI$  in funzione del rapporto  $a/W$ .

Si noti l'andamento quasi costante di  $K$  per  $a/W$  compreso tra 0.45 e 0.7 nel provino indicato con la sigla KCOST3.

Proprio quest'ultimo è stato scelto come provino a  $K$  costante.

Essendo un provino per l'effettuazione di prove di crack-arrest, dalla forma rastremata e caricato a cuneo, è stato identificato con la sigla WLTC A (wedge loaded tapered crack arrest).

La Fig.7 mostra un confronto tra le funzioni  $K(a/W)$  del provino CCA e del provino WLTC A mentre in Fig. 8 sono riportate le funzioni di calibrazione  $f(a/W)$  e la cedevolezza adimensionale CEB del provino WLTC A.

Il polinomio di best fit dei dati ottenuti dal codice SPACCA per la funzione di calibrazione del provino WLTC A è il seguente:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 0.378 - 1.285\left(\frac{a}{W}\right) + 1.829\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 0.55\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 0.368\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (3)$$

L'equazione (3) è stata impiegata, nel corso delle prove sperimentali, per calcolare il  $KI_a$  come indicato dalla eq. 1. Infine la Fig. 9 riporta le dimensioni effettive del provino WLTC A.

#### 4) RISULTATI SPERIMENTALI

La matrice generale di prova ha richiesto la realizzazione di 32 provini, aventi tutti lo spessore di 10 mm. Per effettuare gli opportuni confronti, oltre ai provini WLTCa, sono stati impiegati anche provini CCA.

Per il provino WLTCa sono stati studiati entrambi gli orientamenti TL e LT.

Sul fondo intaglio è stata realizzata una fessura di 0.2 mm e della lunghezza di 5 mm mediante elettroerosione.

Con questo trattamento la profondità iniziale di cricca  $a_0$  è risultata per tutti i provini pari a 35 mm.

Le ultime lavorazioni effettuate sui provini sono state la realizzazione di fori filettati necessari al fissaggio delle lamelle per il trasduttore estensimetrico e la realizzazione di un foro di diametro di 1 mm e profondità 5 mm, praticato nelle vicinanze della zona di fondo intaglio, per l'inserimento della termocoppia necessaria al controllo della temperatura.

L'intervallo di temperatura esplorato va dalla temperatura ambiente fino a  $-80^{\circ}\text{C}$ . Il liquido refrigerante impiegato è stato l'azoto liquido e la lubrificazione delle zone di contatto cuneo-bussola è stata ottenuta tramite interposizione di strati di teflon.

Il sistema di carico per il provino WLTCa, illustrato in Fig. 10, è del tutto identico a quello per il provino CCA.

Nel grafico di Fig. 11 sono riportati i valori di  $K_{I0}$  (fattore di intensità delle tensioni all'innescò della cricca) rilevati sperimentalmente per la lega 7075-T6.

Si noti la sostanziale indipendenza dalla temperatura per i due tipi di provino e le due orientazioni studiate: WLTCa (TL), WLTCa (LT), CCA (TL).

I valori di  $K_{I0}$ , compresi tra 43 e 55  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , sono sensibilmente più alti dei corrispondenti valori di  $K_{Ic}$  (30-35  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) a temperatura ambiente disponibili in letteratura e ciò in quanto il fondo intaglio ottenuto con l'elettroerosione ha un raggio di curvatura  $\rho = 0.2$  mm che, per quanto piccolo, non può essere paragonato al fondo intaglio di una cricca affilata qual'è quella che si ottiene mediante una operazione di precriccaggio per fatica nei provini per le prove di  $K_{Ic}$ .

In Fig. 12 è riportato l'andamento di  $K_{Ia}$ .

Anche in questo caso non si è evidenziata alcuna dipendenza dalla temperatura nell'intervallo studiato (da  $+20^{\circ}\text{C}$  a  $-80^{\circ}\text{C}$ ).

I valori di  $K_{Ia}$  sono compresi tra 22 e 35  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  da confrontare, ad esempio, con i 120  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  di un acciaio ferritico (a temperatura ambiente).

L'indipendenza del fenomeno della propagazione instabile di una cricca dalla temperatura per la lega 7075-T6 è confermata anche dal grafico di Fig. 13 in cui sono riportati i  $\Delta a$  (fase di arresto-fase di inizio) in funzione della temperatura. Questo stesso grafico mostra che le propagazioni sono state mediamente superiori nei provini WLTCa rispetto a quelli CCA.

In particolare la propagazione massima, circa 55 mm ottenuta in un provino WLTCa (LT), apre interessanti possibilità di ricerca futura riguardanti la misurazione della velocità della cricca. La Fig. 14 mostra l'andamento di  $K_{Ia}$  in funzione di  $K_{I0}$ .

Le maggiori propagazioni della cricca ottenute nei provini WLTCa si deducono anche dal grafico di Fig. 15. In esso si può anche notare l'andamento costante di  $K_{Ia}$  per  $0.015 \leq \Delta a \leq 0.035$  ( $0.5 \leq a/W \leq 0.7$ ) per i provini WLTCa: ciò è in accordo con l'andamento della funzione di calibrazione  $f(a/W)$ .

In Fig. 16 è riportato l'andamento del  $\Delta a$  in funzione del carico di iniziazione, sempre per la lega 7075-T6.

Il comportamento della lega 2024-T351 si è rivelato molto diverso rispetto a quello della 7075-T6.

Nel corso delle prove effettuate si è avuta una sola propagazione instabile della cricca che comunque ha comportato un valore di  $K_{Ia}$  non valido.

Il provino tende a lacerarsi raggiunta una certa apertura ed è possibile mantenere l'avanzamento della frattura solo continuando ad applicare il carico. La lacerazione progressiva è indice di una sensibile plasticizzazione del fondo intaglio.

Per quanto concerne i risultati, non essendosi verificata propagazione instabile della cricca, è stato impossibile ricavare il  $K_{Ia}$ . In Fig. 17 sono riportati gli andamenti di  $K_{I0}$  e dei carichi di iniziazione per i sei provini di alluminio 2024-T351 utilizzati.

Il valore del  $K_{I0}$  per la 2024-T351 si è rivelato mediamente superiore di  $10 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$  rispetto a quello misurato per la 7075-T6.

In conclusione, per riuscire a studiare il fenomeno della propagazione instabile di una cricca nella 2024-T351, sarà necessario mettere a punto un sistema di innesco della frattura più efficace di quello basato semplicemente sul raggio di fondo intaglio pari a 0.2 mm.

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha permesso di stabilire la fattibilità della prova di crack-arrest sulla lega di alluminio 7075-T6 utilizzando provini piani caricati a cuneo.

E' emersa l'esigenza di utilizzare un provino appositamente disegnato; tale provino è stato sviluppato e calibrato (provino WLTCa) ed ha permesso di caratterizzare la lega 7075-T6 a temperature variabili fra  $-800\text{C}$  e la temperatura ambiente.

I risultati sperimentali hanno mostrato una sostanziale indipendenza della tenacità all'arresto dalla temperatura di prova.

La sperimentazione svolta ha inoltre evidenziato notevoli difficoltà di iniziazione di propagazioni instabili nella lega di alluminio 2024-T351. per tale lega sarà necessario mettere a punto un sistema di innesco più efficace di quello utilizzato per la lega 7075-T6.

La particolare geometria del provino WLTCa, determinando il verificarsi di propagazioni di sufficiente lunghezza, consentirà in futuro la misura sperimentale della velocità di propagazione nelle leghe di alluminio.

## BIBLIOGRAFIA

(1) ASTM E1221-88 "Standard test method for determining the plane-strain crack arrest fracture toughness,  $K_{Ia}$  of ferritic steels." 1988 Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA.

(2) P.P. Milella, C. Lusso, C. Sampietri, "Simulation of Unstable Crack Propagation by a Two-Dimensional Dynamic Linear Elastic Finite Element Computer Program" 8th SMiRT Conference, August 1985, Brussels, Vol. B4/7.

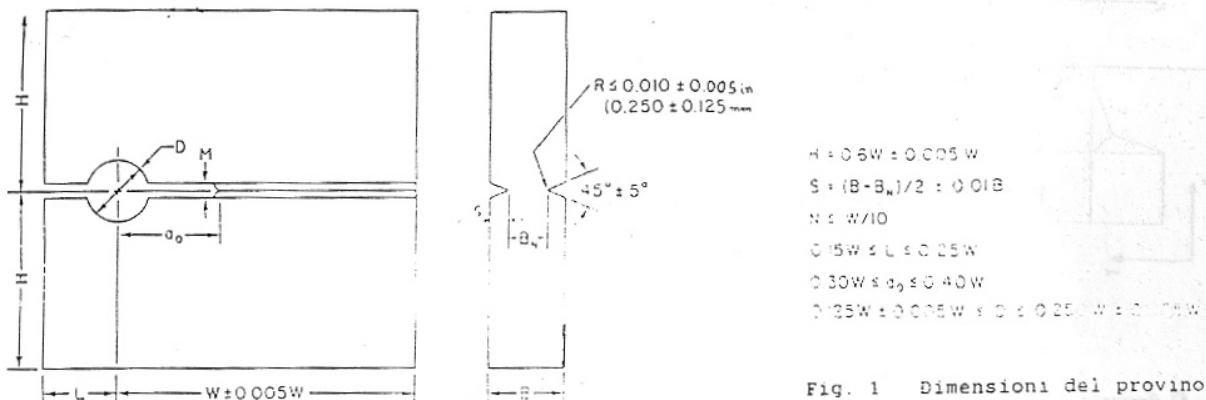


Fig. 1 Dimensioni del provino CCA.

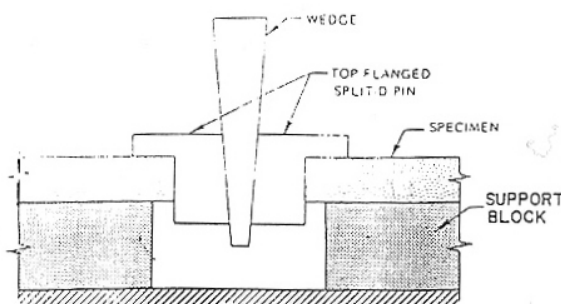
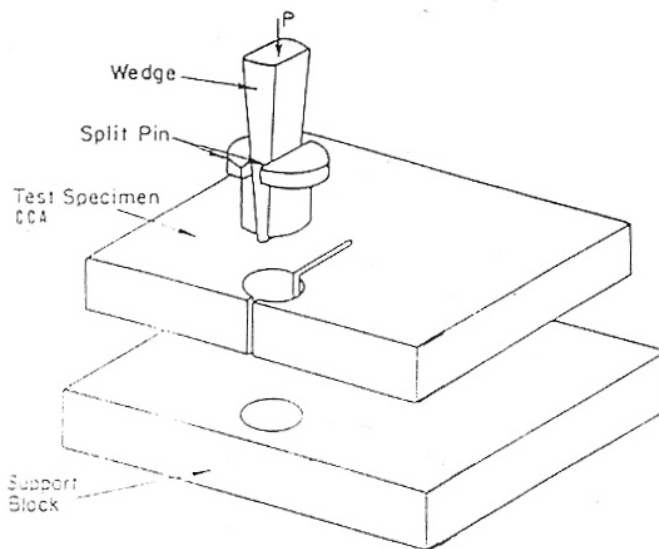


Fig. 2 Schematizzazione del sistema di carico in una prova di crack-arrest.

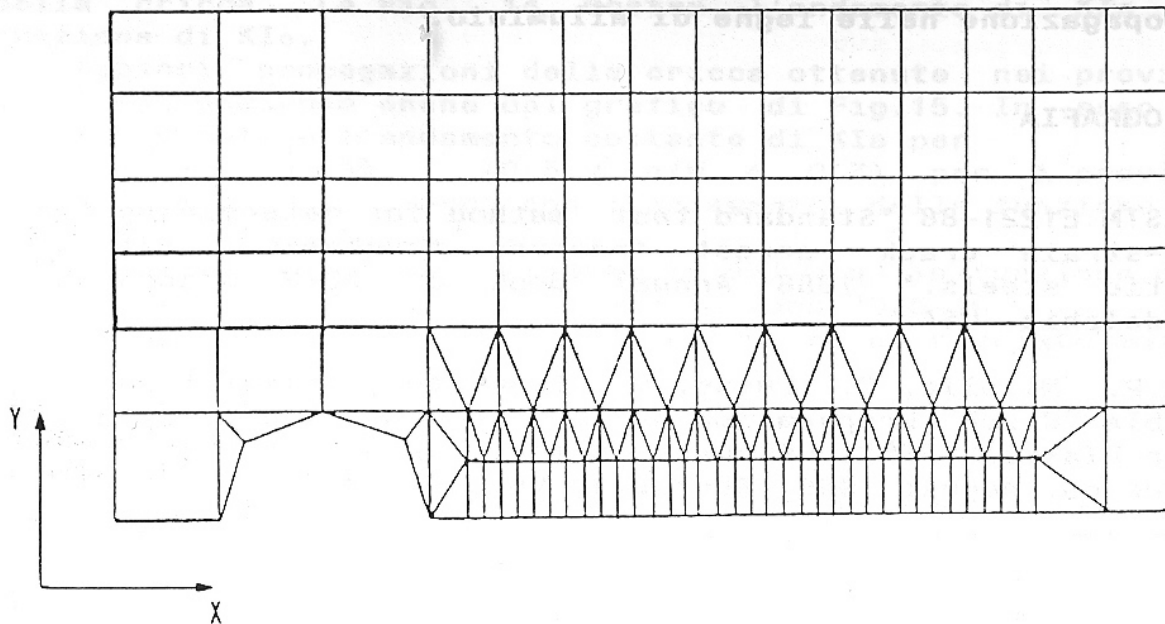


Fig. 3 Discretizzazione del provino CCA.

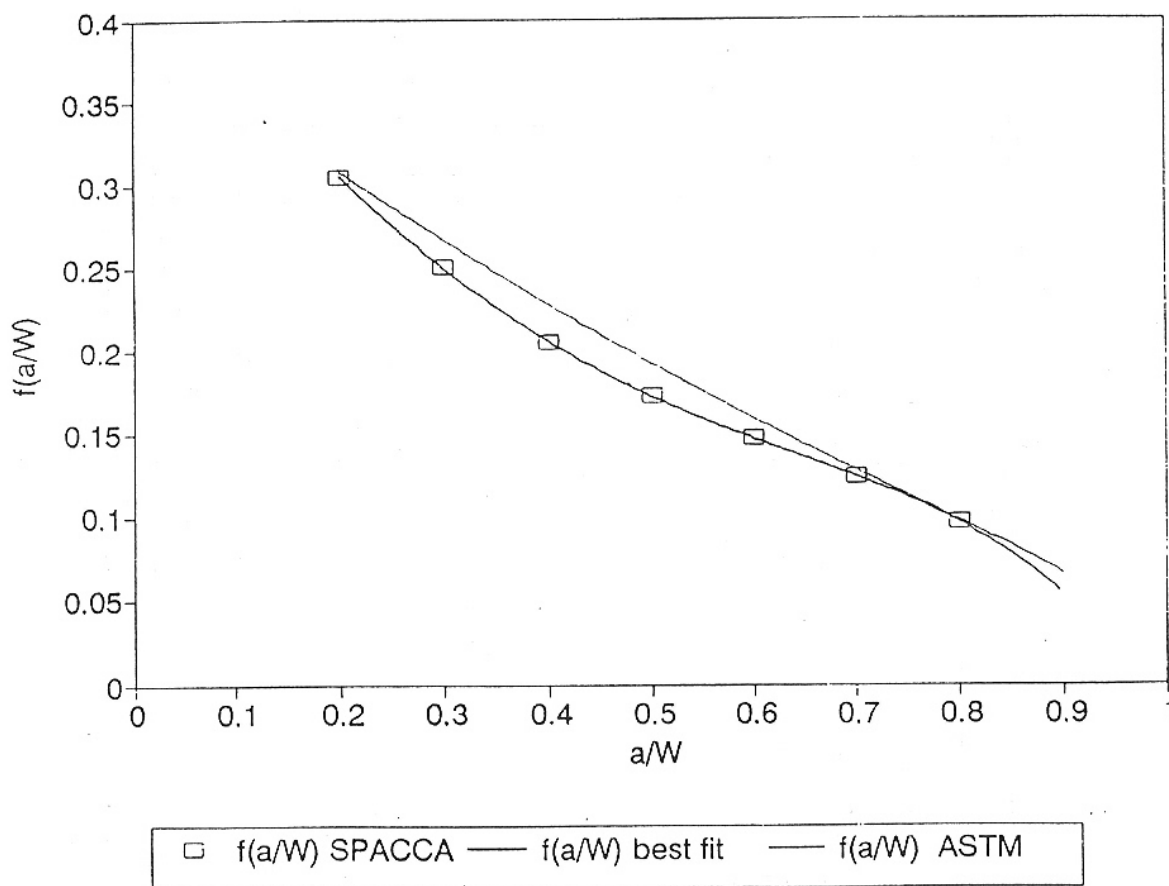
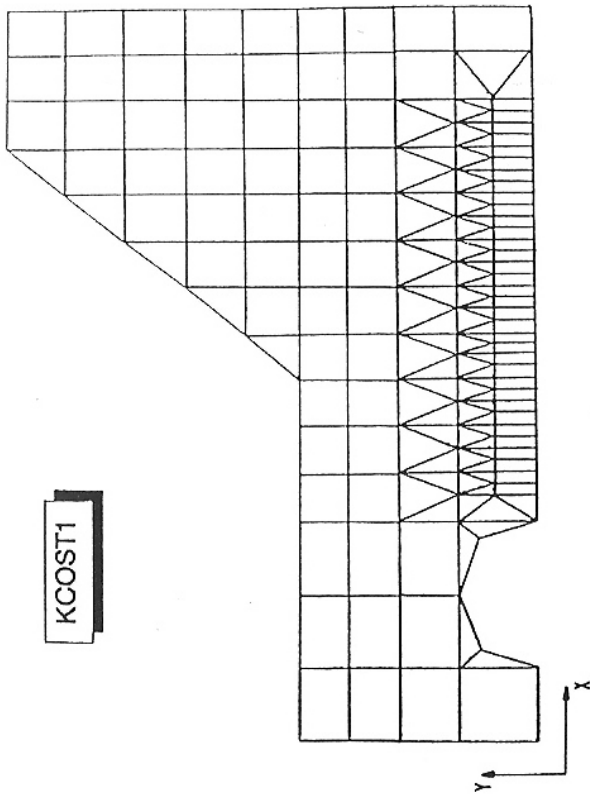
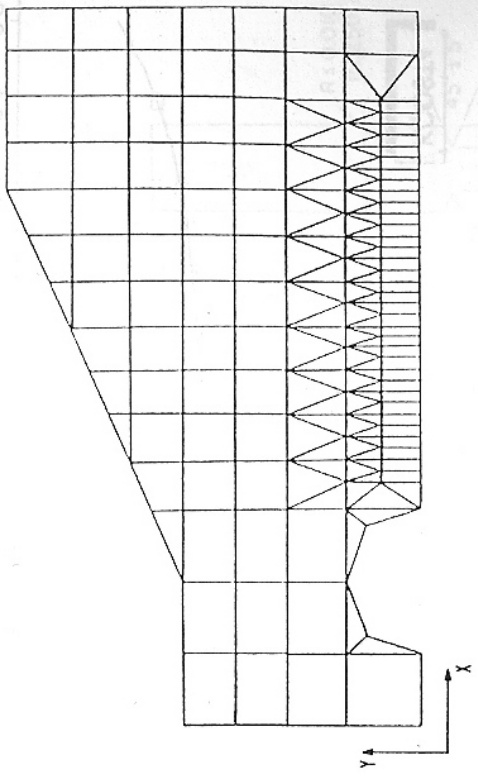


Fig. 4 Funzioni di calibrazione del provino CCA.

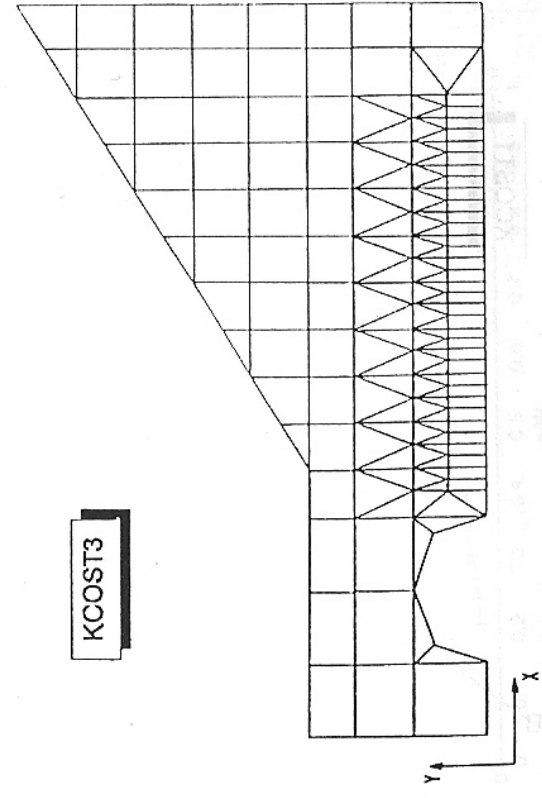




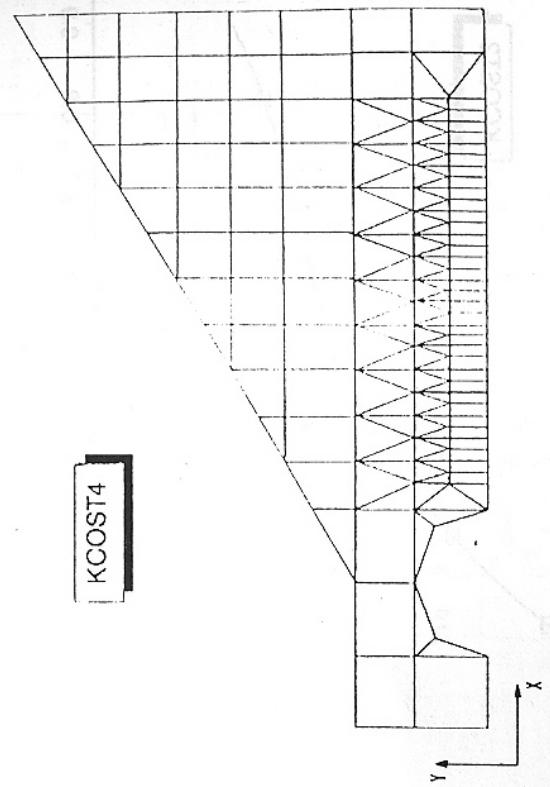
KCOST1



KCOST2

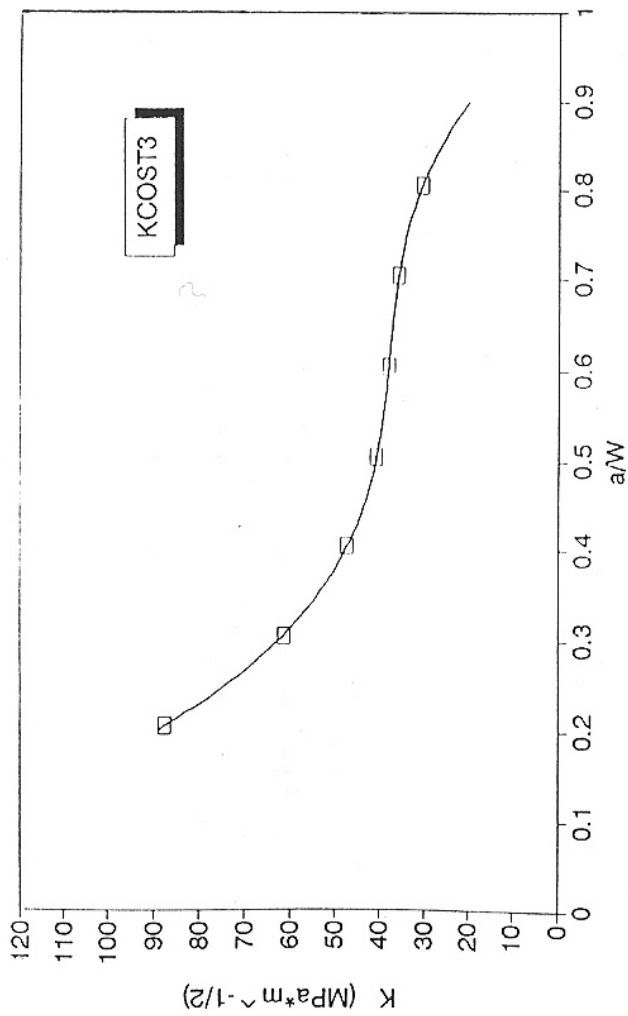
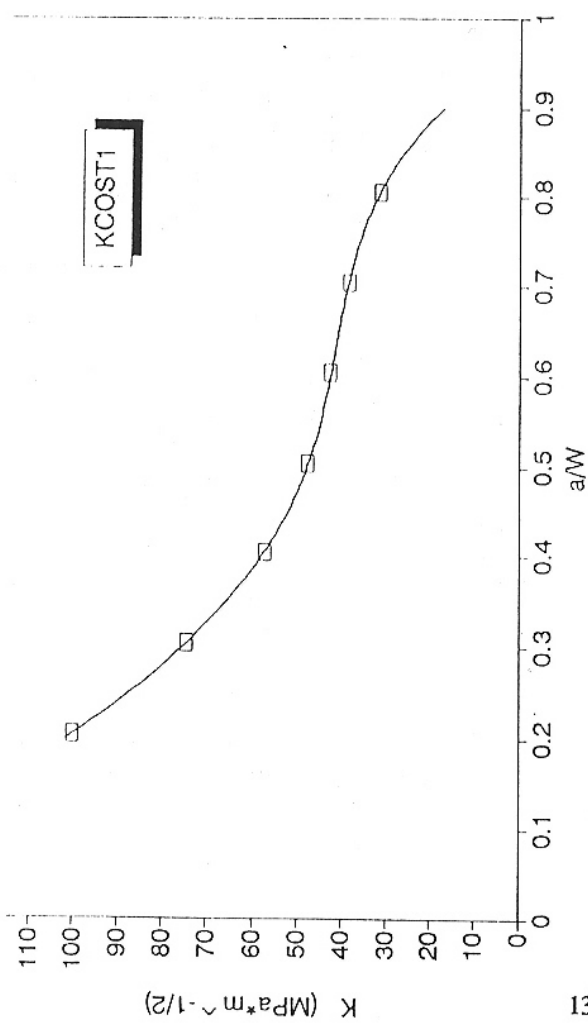
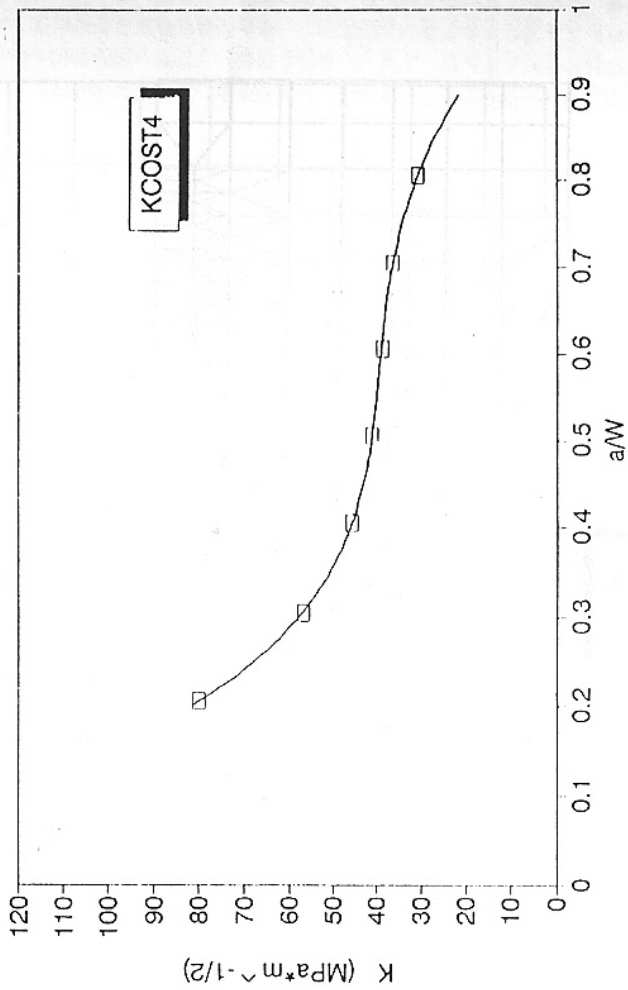
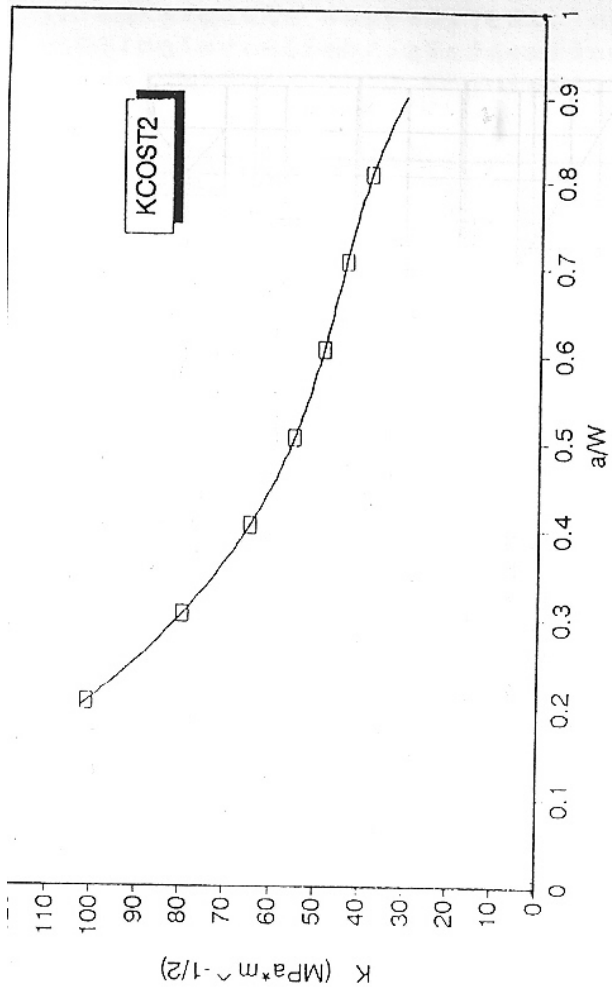


KCOST3



KCOST4

Fig. 5 Discretizzazione dei provini studiati.



□ K Spacca — K best fit

Fig. 6 Funzioni  $K(a/w)$  per i provini studiati.

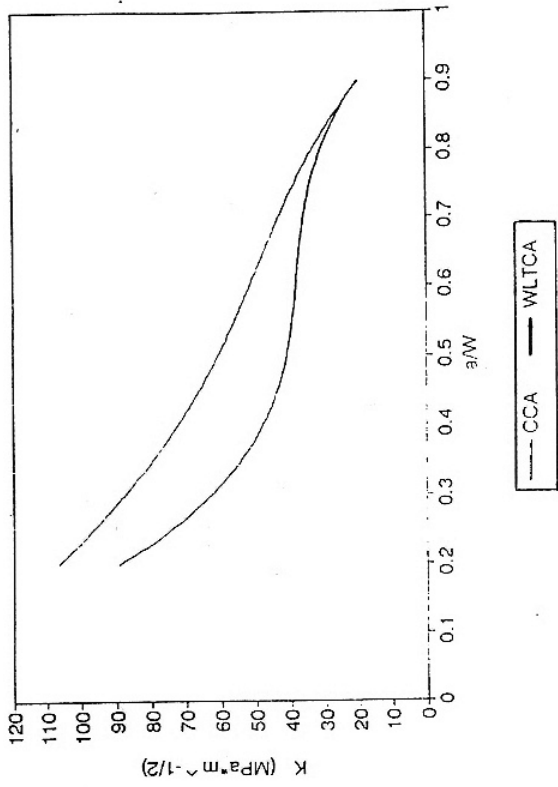


Fig. 7 Confronto tra il provino CCA e il provino WLTC.

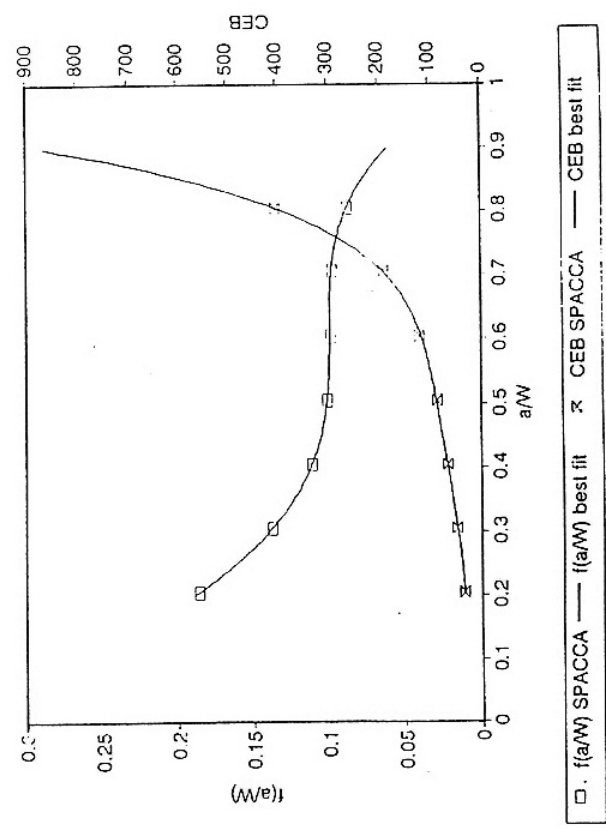


Fig. 8 Funzioni di calibrazione del provino WLTC.

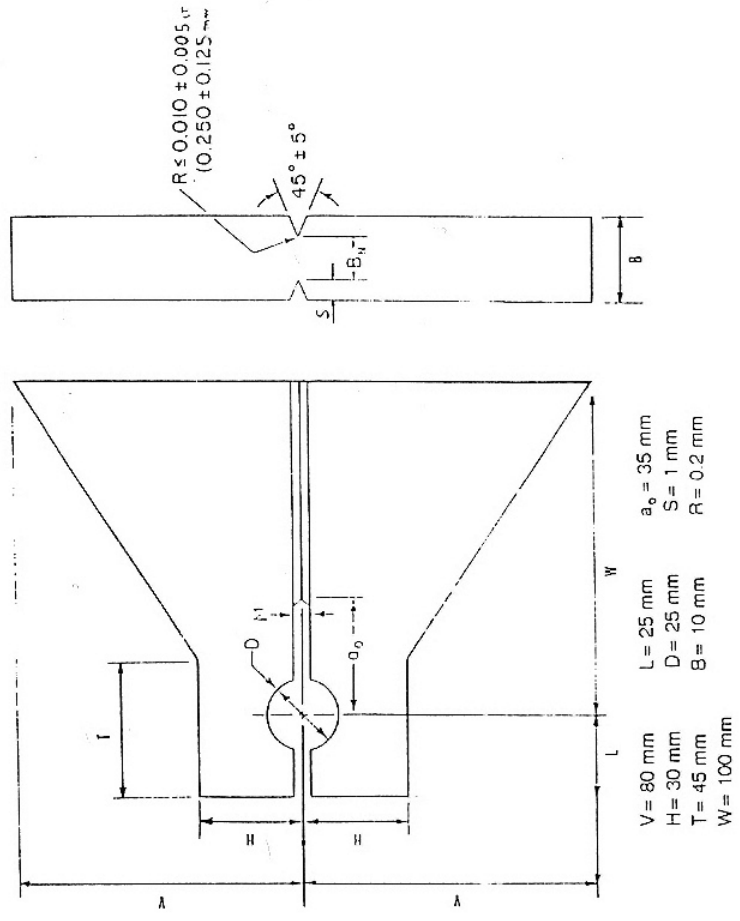


Fig. 9 Dimensioni del provino WLTC.

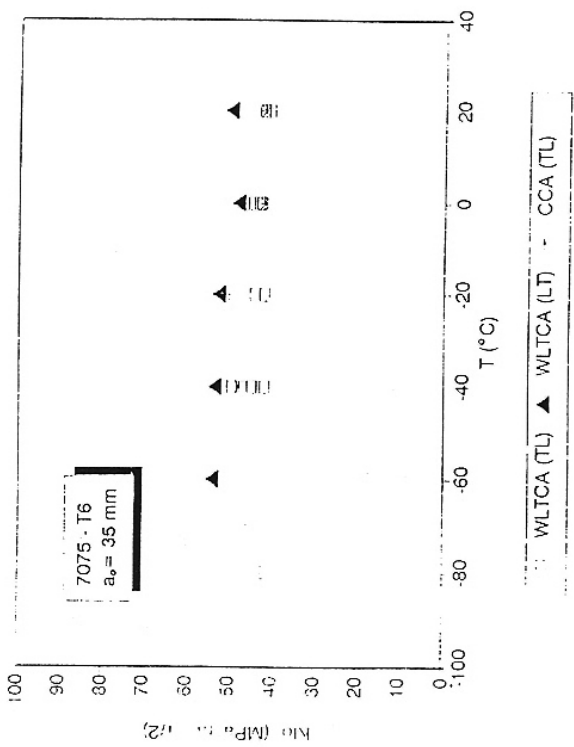


Fig. 11 K<sub>Ic</sub> in funzione della temperatura.

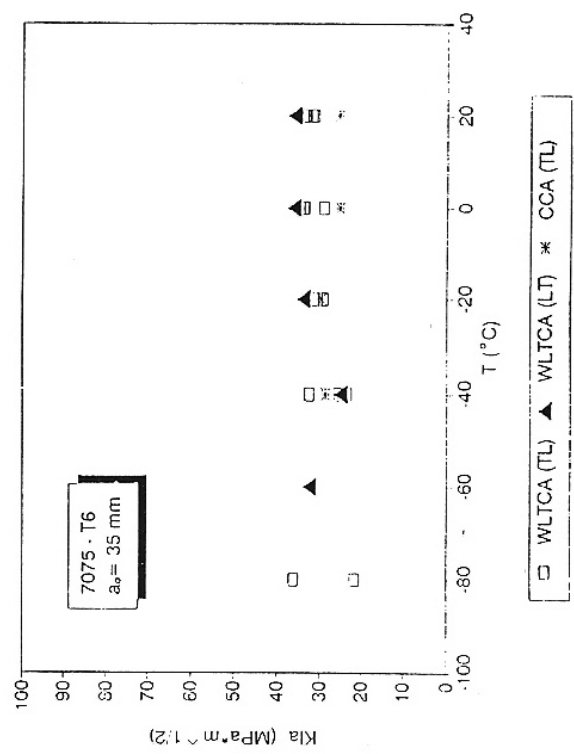


Fig. 12 K<sub>Ic</sub> in funzione della temperatura.

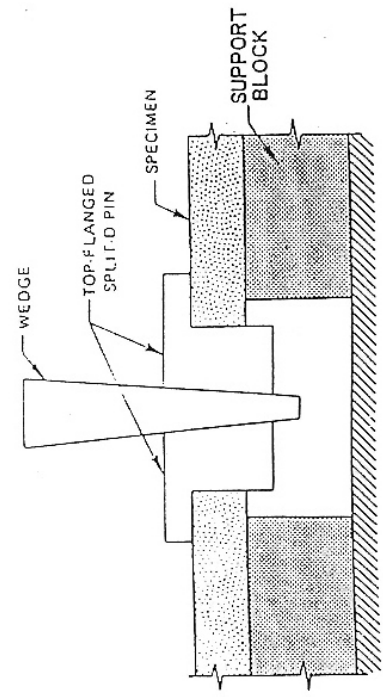
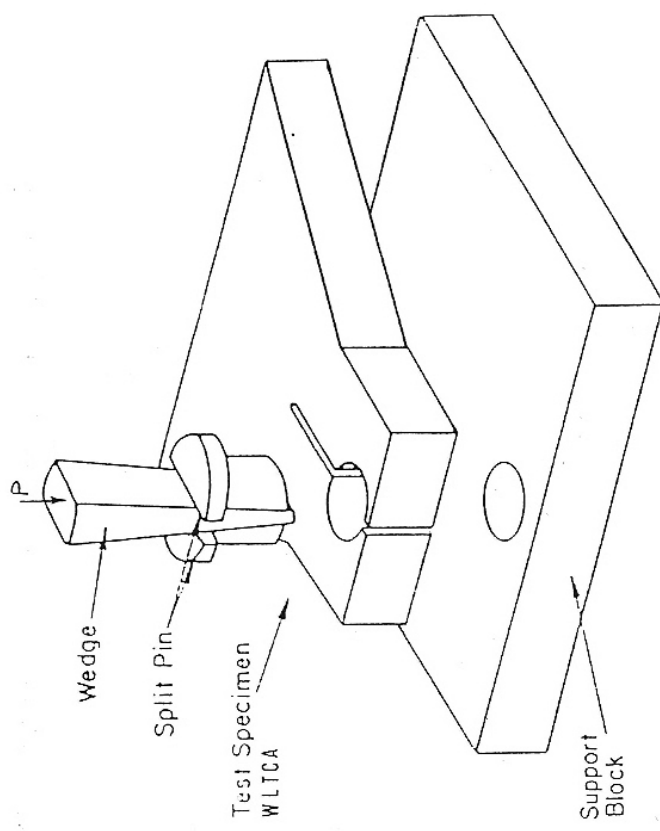


Fig. 10 Sistema di carico per il provare WLTCAs.

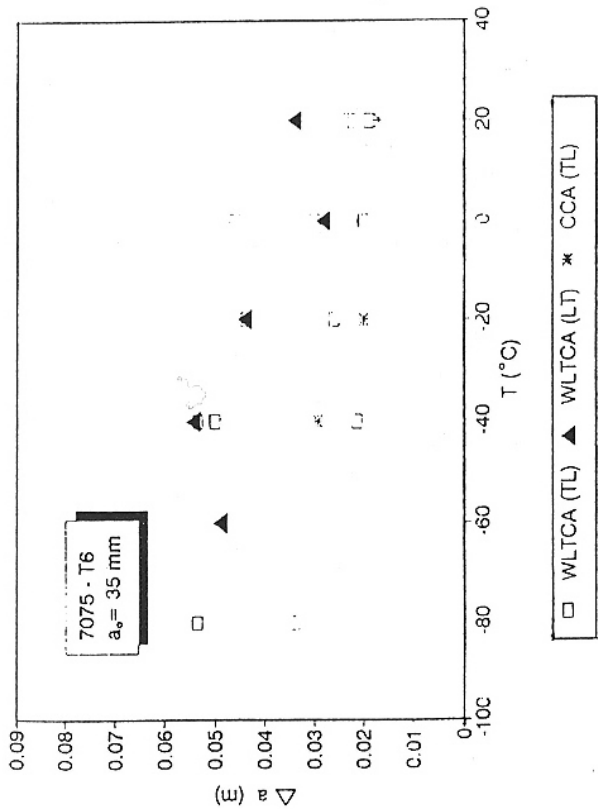


Fig. 13  $\Delta a$  in funzione della temperatura.

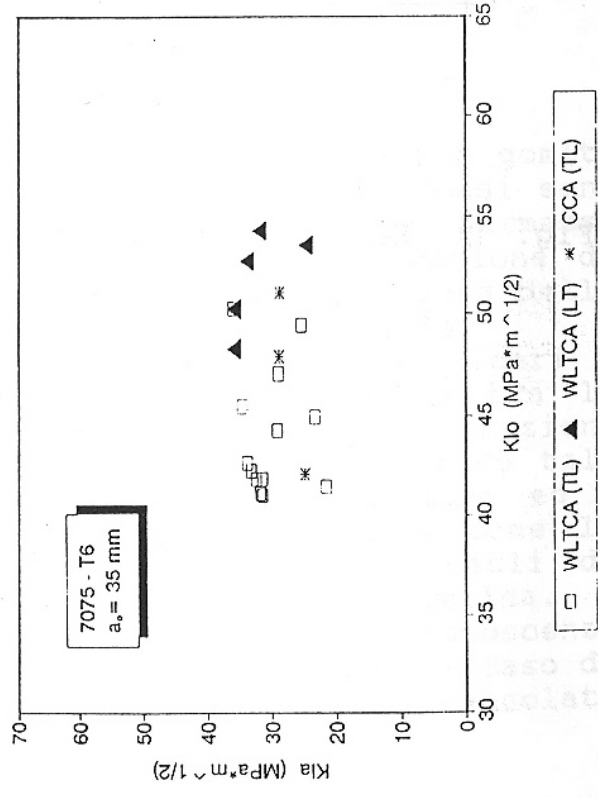


Fig. 14  $K_{I0}$  in funzione di  $\Delta a$ .

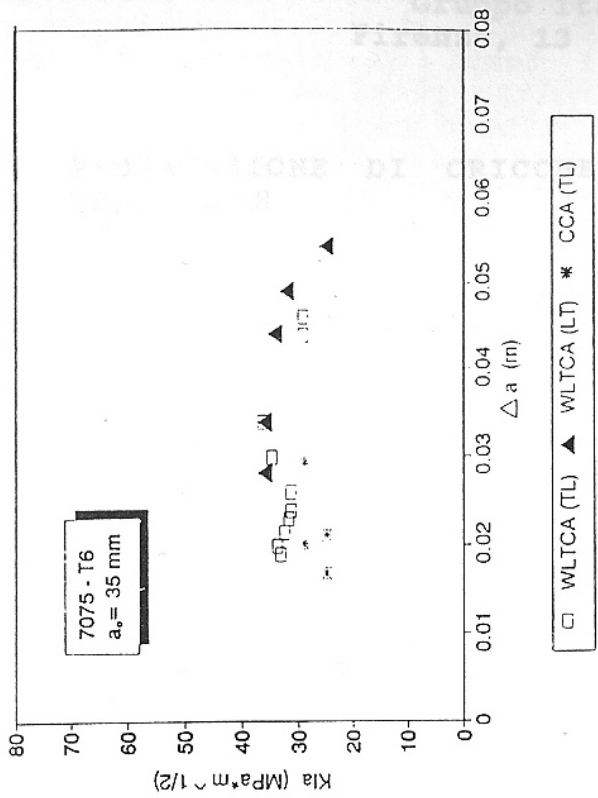


Fig. 15  $K_{I0}$  in funzione di  $\Delta a$ .

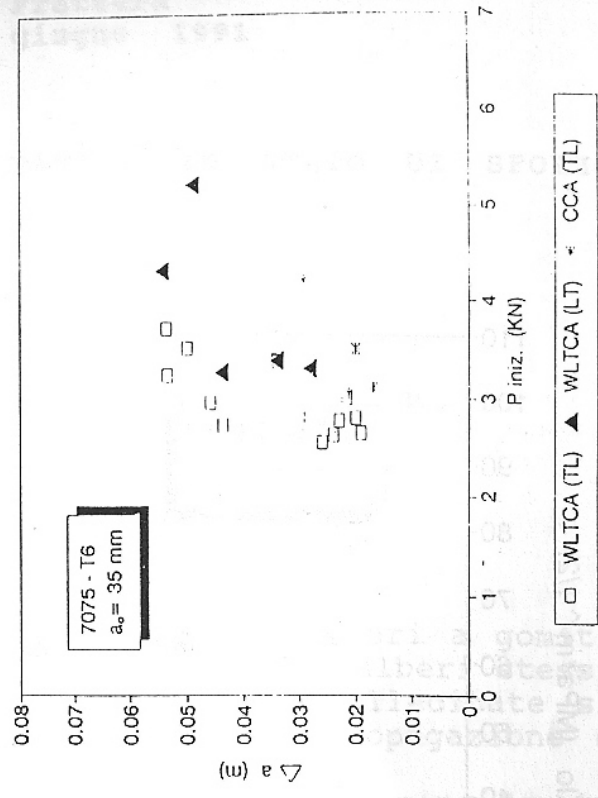


Fig. 16  $\Delta a$  in funzione del carico di iniziazione.

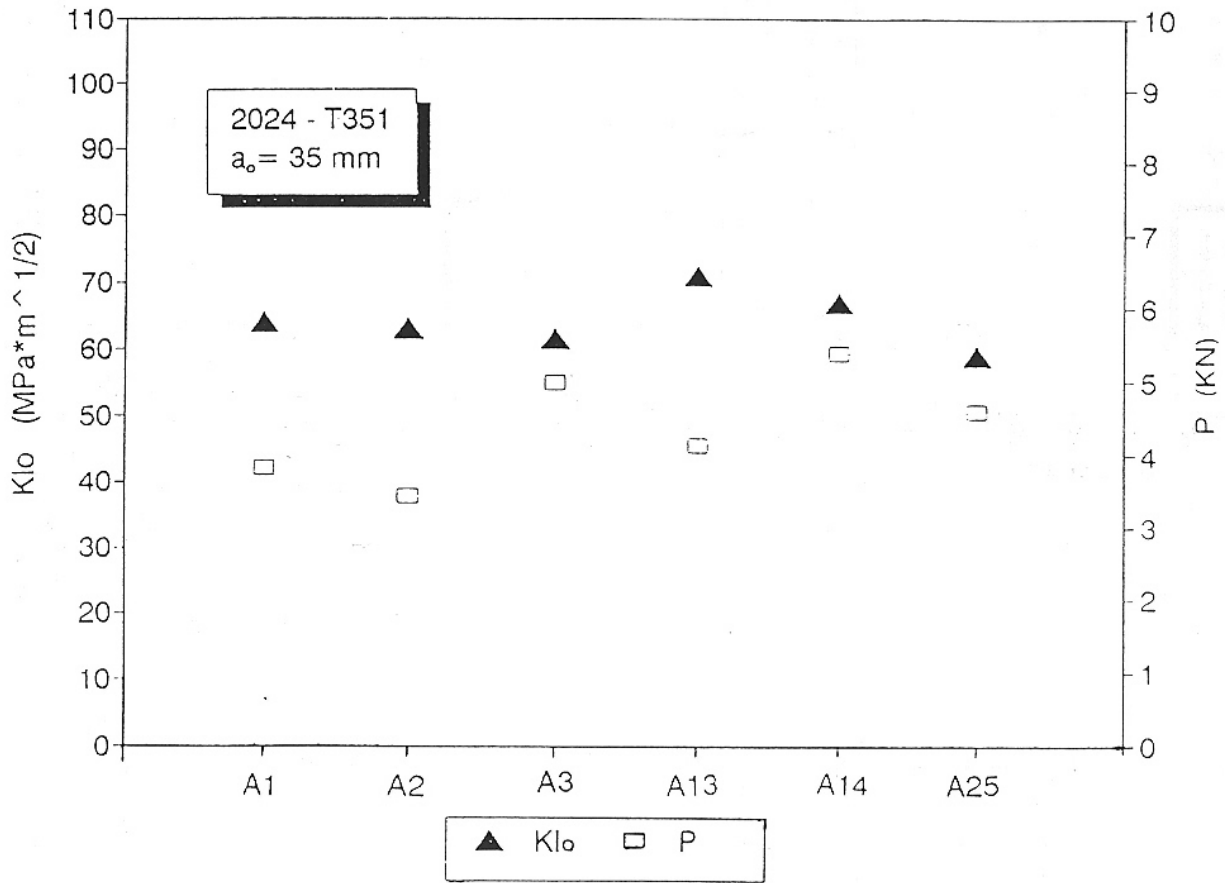


Fig. 17 K<sub>I0</sub> e P iniziale per tutti i provini di Al 2024-T351.