



**EFFETTO DELLO STATO DI PREDEFORMAZIONE**  
**E DELLE MODALITA' DI PROVA SUL**  
**VALORE DEL CTOD IN ZTA DI**  
**TUBI SALDATI**

S. Budano (PMI-CSM)  
A. Podrini (PMI-CSM)  
L. Rizzi (ITALSIDER-TA)

Roma, aprile 1988

Memoria da presentare a:  
IV Convegno Nazionale  
Gruppo Italiano Frattura (IGF)  
presso CISE (Milano)  
26-27 Maggio 1988



EFFETTO DELLO STATO DI PREDEFORMAZIONE  
E DELLE MODALITA' DI PROVA SUL  
VALORE DEL CTOD IN ZTA DI  
TUBI SALDATI

S. Budano(\*), A. Podrini(\*), L. Rizzi(\*\*)

(\*) Centro Sviluppo Materiali S.p.A. - Roma, Italia

(\*\*) Italsider - Taranto, Italia

1. INTRODUZIONE

Fra le specifiche di accettazione dei tubi di acciaio saldati, viene frequentemente richiesto il superamento di prefissati valori dei parametri di meccanica della frattura elastoplastica (CTOD e J integral).

La misura del CTOD, per la valutazione della tenacità della saldatura di un tubo di acciaio può presentare difficoltà legate alle modalità di preparazione dei campioni di prova.

Essendo il CTOD dipendente dalle condizioni locali del fondo intaglio, la sua misura può essere perturbata da anisotropia di comporamento dovuta a variazioni microstrutturali o alla presenza di tensioni residue a fondo intaglio, generatesi a seguito dei procedimenti di saldatura o delle procedure di preparazione degli stessi campioni di prova /1/.

Inoltre, la normativa esistente (BS 5762) non impone vincoli ben definiti sulle modalità di preparazione dei campioni di prova, in special modo per strutture particolari quali un tubo saldato.

Le principali problematiche relative alla preparazione dei provini sono in massima parte legate alla fase di crescita della cricca per fatica dall'intaglio di macchina presente sul provino.

Quando i campioni sono prelevati da strutture sagomate a freddo, come nel caso dei tubi di grande diametro, o sono interessate zone saldate, la presenza di un irregolare profilo della cricca di fatica, non consentito dalla normativa, può portare ad uno scarto anche del 30% dal totale dei test /2/.

Le cause principali di tale inconveniente possono essere attribuite sia al raddrizzamento della provetta, per prelievi in direzione TL, sia alla presenza di saldature. In ambedue i casi, la



presenza di un campo di tensioni residue a fondo intaglio può favorire la propagazione per fatica lungo lo spessore del campione, causando un profilo irregolare del fronte della cricca.

La fase di raddrizzamento a freddo dei provini crea un campo di tensioni residue lungo lo spessore, con segno contrapposto sulle facce della provetta. La cricatura di fatica risulterà più estesa da un lato rispetto all'altro, Fig. 1a,/3/.

La saldatura dei lembi della lamiera causa un gradiente di stress residui, con compressione a metà spessore e conseguente impedimento della propagazione a fatica, Fig. 1b,/2/.

Nel caso in cui campioni saldati, prelevati in direzione TL, subiscono raddrizzamento, si ha la sovrapposizione dei due fenomeni, Fig. 1c.

Col presente lavoro si intende portare un contributo relativamente alla definizione delle modalità di misura del CTOD per la qualificazione dei tubi saldati di grande diametro o più in generale di prodotti curvi.

## 2. - ATTIVITA' SPERIMENTALE

L'attività è stata condotta su spezzoni di acciaio microlegato laminato in controllo di grado medio-basso e non espressamente progettato per un controllo della tenacità in ZTA alle basse temperature.

Per quanto riguarda la preparazione dei campioni ricavati dalla parete del tubo in direzione trasversale (orientazione TL), si è valutata l'opportunità di eseguire il raddrizzamento meccanico dello spezzone, in alternativa ad una lavorazione di macchina, così da rendere le superfici della provetta parallele. Per le misure del CTOD in ZTA, essendo la saldatura eseguita con giunto ad X, si è valutato l'effetto del posizionamento dell'intaglio sulla significatività delle misure risultando critico questo aspetto a causa della ridotta zona in cui deve essere posizionato il fondo intaglio (Fig. 2).

Oltre alle modalità di preparazione dei campioni, sono state prese in considerazione anche variabili di prova quali carico ultimo di cricatura e velocità di applicazione del carico in fase di prova.

Per la sperimentazione si è considerato sia il materiale base che il materiale in zona termicamente alterata (ZTA).

I campioni a disposizione per la campagna di prove ammontavano all'incirca a 100, di cui il 50% prelevati da materiale base e il 50% da materiale in ZTA.



## 2.1 - Effetto del raddrizzamento

La prima variabile di prova presa in considerazione, relativamente alla preparazione dei campioni, è stata il raddrizzamento. Per essa sono state realizzate due condizioni:

- a) raddrizzamento massimo (campione di prova piano)
- b) raddrizzamento nullo.

Relativamente al punto b) i campioni di prova sono stati spianati di macchina (Fig. 3), realizzando due facce parallele di lunghezza pari almeno a quattro volte lo spessore. Per soddisfare questa condizione è stato necessario ridurre lo spessore delle provette di circa il 10%. La stessa riduzione è stata realizzata anche sui provini piani, al fine di ottenere dei valori di CTOD tra loro paragonabili.

Per stabilire la posizione dell'intaglio di macchina sui campioni prelevati in ZTA è stata seguita una raccomandazione del Welding Institute /4/ che prevede di realizzare tale intaglio su un piano che interessi, a centro provino, la zona termicamente alterata con estensione pari ad almeno 1/3 dello spessore (vedi Fig. 2).

Come verrà descritto in seguito, tale posizione è stata poi variata per poter valutare la sua influenza sul valore del CTOD.

Già nella fase di cricatura dei provini con carico di fatica, si è potuto evidenziare il diverso comportamento del materiale base e del materiale in ZTA, relativamente alle due modalità di raddrizzamento (a,b) considerate.

Nelle Figg. 4 e 5 vengono illustrate, per il materiale base e per il materiale corrispondente alla ZTA, le superfici di frattura di alcuni provini scelti come rappresentativi di situazioni ricorrenti in cui è bene evidente il fronte della cricca di fatica. I campioni classificati con la sigla 1 si riferiscono alla situazione di raddrizzamento nullo mentre i campioni con la sigla 3 si riferiscono alla situazione di raddrizzamento massimo.

In entrambi i casi risulta molto evidente l'effetto di distorsione del fronte della cricca dovuto alle tensioni residue che si inducono lungo lo spessore del provino per effetto dell'operazione di raddrizzamento. Tale effetto per i due materiali è risultato di entità diversa in quanto, mentre per il materiale in ZTA la totalità dei provini criccati di fatica sono risultati entro la variabilità ammessa dalla norma BSI, per il materiale base su n° 20 provini criccati, soltanto 5 sono risultati in norma.

Il fronte della cricca di fatica risulta invece piuttosto regolare per i provini curvi, fatta eccezione per alcuni, relativi al materiale in ZTA, che hanno presentato piccole irregolarità.



## 2.2 - Effetto della precompressione

La seconda variabile di prova presa in considerazione è stata la precompressione del provino lungo lo spessore. Tale operazione tende a rendere uniforme lo stato di sollecitazioni residue presenti, allo scopo di eliminare gli effetti di distorsione del fronte della cricca precedentemente discussi /4,5/.

Il grado di deformazione plastica in compressione realizzato è stato di entità pari all'1% dello spessore del provino, suddiviso al 50% sui due lati opposti.

In Fig. 6 è rappresentato schematicamente il dispositivo a punzoni utilizzato per tale operazione mentre in Fig. 7 è riportato un tipico andamento del carico di compressione in funzione del tempo. La penetrazione del punzone viene calcolata in modo che la deformazione residua, cioè priva della parte elastica, corrisponda al valore prescelto. L'applicazione del carico viene interrotta a penetrazione ultimata. Tale momento è riconoscibile sul diagramma in corrispondenza della netta variazione di pendenza.

Per entrambi i materiali, si è effettuata la precompressione su due serie di campioni di prova, ciascuna relativa alle due condizioni di raddrizzamento considerate.

Con riferimento alle Figg. 4 e 5 (materiale base e ZTA), la sigla 2 identifica un provino curvo compresso mentre la sigla 4 un provino piano compresso.

Paragonando, in entrambe le figure, i provini non compressi (a sinistra) con quelli compressi (a destra) si nota nettamente come l'operazione di compressione tenda a regolarizzare il fronte della cricca di fatica.

## 2.3 - Effetto della posizione dell'intaglio

La terza variabile presa in considerazione è stata la posizione della cricca di fatica in ZTA. Tale posizione è stata fatta variare (vedi Fig. 8) spostando il piano di intaglio di entità pari ad 1 mm verso la zona fusa in un caso ed 1 mm verso il materiale base nell'altro, entrambe rispetto al piano intaglio stabilito dalle raccomandazioni in precedenza discusse /4/.

## 2.4 - Effetto della modalità di criccatura

La quarta variabile di prova è stata realizzata in fase di criccatura. E' stato variato il carico ultimo di fatica applicato al provino, esplorando l'effetto di una variazione di entità pari a  $\pm 20\%$  del valore indicato dalla normativa BSI. Ciò al fine di poter valutare una possibile influenza di tale variazione del carico di fatica sul valore del CTOD successivamente misurato.



## 2.5 - Condizioni di prova

Per entrambi i materiali (ZTA e base) è stata eseguita l'intera curva di transizione CTOD-Temperatura di prova, per ciascuno dei casi precedentemente descritti.

Le prove sono state effettuate su macchina INSTRON da 25 ton, utilizzando un clip-gauge realizzato al C.S.M. e sistema di acquisizione della L.C.R. La curva Carico - apertura dell'intaglio, nel corso della prova, è stata registrata su registratore potenziometrico.

Sono state utilizzate varie velocità di avanzamento della traversa, da 0,1 cm/min a 0,005 cm/min per valutare, specialmente su materiale base con presenza di separazioni, se questa variabile potesse risultare influente sul risultato del valore del CTOD.

Per le prove da eseguire a temperatura diversa da quella ambiente è stata utilizzata una camera criostatica e termostatica con: azoto liquido per il raffreddamento ed olio per il riscaldamento delle provette.

## 3. - RISULTATI E DISCUSSIONE

### 3.1 - Prove CTOD su materiale in ZTA

Per il materiale in ZTA sono state ricavate quattro curve di transizione temperatura-CTOD, per i quattro casi considerati che di seguito vengono elencati:

- a) provino curvo
- b) provino curvo compresso
- c) provino raddrizzato
- d) provino raddrizzato compresso.

Da un confronto tra le curve di Fig. 9 e prendendo come riferimento la curva relativa al caso a) (provino curvo) è possibile fare le seguenti considerazioni:

- i) confronto con curva relativa al caso b) (provino curvo compresso): i due andamenti risultano pressochè uguali salvo un leggero abbassamento del CTOD in zona shelf superiore nel caso del provino compresso;
- ii) confronto con curva relativa al caso c) (provino raddrizzato): si evidenzia uno spostamento della temperatura di transizioni di un  $\Delta T$  pari a  $+ 15^{\circ}\text{C}$ ;
- iii) confronto con curva relativa al caso d) (provino raddrizzato compresso): si evidenzia un significativo spostamento della temperatura di transizione di un  $\Delta T$  pari a  $+ 30^{\circ}\text{C}$  ed un abbassamento del valore massimo del CTOD di circa il 20%. L'operazione di compressione, quindi, oltre ad aumentare ulteriormente la temperatura di transizione rispetto al caso



ii) provoca anche un abbassamento del CTOD, fenomeno che anche se riscontrabile nel caso i) precedentemente considerato, risulta di scarso interesse pratico nel senso che si manifesta in un campo di valori del CTOD comunque elevati.

L'ultimo caso analizzato è da ritenersi il più interessante nella caratterizzazione di materiali ricavati da tubi di grande diametro e di spessore contenuto entro i 20-25 mm.

In pratica, infatti, il campione di prova o si realizza nella sua geometria originale oppure, se la si modifica con l'operazione di raddrizzamento, la successiva operazione di compressione risulta indispensabile per ovviare alle difficoltà che si presentano in fase di cricatura.

Relativamente al caso a) (provino curvo) è stata, inoltre, realizzata una curva di transizione CTOD-Temperatura in cui il piano di intaglio è stato spostato di 1 mm in direzione della zona fusa. In Fig. 10 è riportata tale curva a confronto con la curva di riferimento ottenuta con il piano d'intaglio posizionato seguendo le raccomandazioni emesse dal Welding Institute.

Per il caso d) (provino raddrizzato compresso) invece sono state ricavate due curve effettuando lo spostamento (sempre di 1 mm) sia in direzione della zona fusa che in direzione del materiale base. In Fig. 11 vengono riportate le suddette curve, insieme con quella di riferimento.

E' interessante notare come, in entrambi casi considerati, avvenga uno spostamento della temperatura di transizione di un  $\Delta T$  negativo, nel senso di un miglioramento in termini di tenacità del materiale.

Ciò assicura che le raccomandazioni seguite nell'individuazione del piano d'intaglio consentono di pervenire ad un risultato del valore del CTOD in ZTA sicuramente conservativo.

Durante l'esecuzione delle prove è stato inoltre verificato in più casi che l'influenza della variazione del carico ultimo di precricatura risulta non significativa sul risultato del CTOD. Analogamente, la variazione della velocità di applicazione del carico in fase di prova, nell'intervallo dei valori considerati, (da 0.015 a 0.0008 mm/s) non ha prodotto effetti significativi sui valori del CTOD.

### 3.2 - Prove CTOD su materiale base

Anche per il materiale base sono state realizzate quattro curve CTOD-Temperatura relative a:

- a) provino curvo
- b) provino curvo compresso
- c) provino raddrizzato
- d) provino raddrizzato compresso.



Prima di entrare nel merito della presentazione dei risultati va anticipato che i diagrammi Carico - apertura intaglio relativi alle prove sul materiale base presentano numerose discontinuità dovute alla comparsa di separazioni (vedi Fig. 12) durante l'esecuzione della prova CTOD, fenomeno questo del resto noto, essendo il materiale in questione proveniente da un processo di laminazione in controllo.

La contemporaneità tra la comparsa delle discontinuità (pop-in) sulla curva Carico - apertura intaglio e la formazione delle separazioni è stata verificata in più casi con l'ausilio della tecnica dell'E.A., e confermata dall'esame delle superfici di frattura (Fig. 12).

In Fig. 13 viene riportato un diagramma Carico - apertura intaglio rappresentativo di questa fenomenologia, in cui vengono indicate le varie discontinuità manifestatesi sul diagramma stesso e quelle individuate con l'E.A.

Dovendo scegliere un criterio di interpretazione dei diagrammi Carico - apertura intaglio per la valutazione del CTOD, è stato stabilito di trascurare le separazioni e prendere il valore dell'apertura dell'intaglio carico massimo.

Questo criterio è in accordo con i suggerimenti contenuti in una recente procedura operativa emessa dal Welding Institute /6/.

Inoltre l'effetto duttilizzante delle separazioni sulla tenacità del materiale /7,8,9/ e l'effetto sulla formazione delle separazioni stesse dovuto al campo di sollecitazione che viene indotto nel provino per effetto delle operazioni di raddrizzamento e di compressione quando presenti, rendono meno intuitiva l'interpretazione dei risultati riportati globalmente in Fig. 14. In prima analisi le curve risultano più raggruppate rispetto a quelle relative al caso del materiale in ZTA, mentre da un confronto individuale e prendendo come riferimento la curva relativa al caso a) (provino curvo) si può dedurre quanto segue:

- i) confronto con caso b) (provino curvo compresso):  
si evidenzia uno spostamento della temperatura di transizione di un  $\Delta T$  pari a circa  $-20^{\circ}\text{C}$  ed un lieve abbassamento del CTOD in shelf superiore;
- ii) confronto con caso c) (provino raddrizzato):  
il comportamento in questo caso è molto simile al precedente a meno di un più accentuato abbassamento del CTOD in shelf superiore;
- iii) confronto con caso d) (provino raddrizzato compresso):  
in questo caso si nota soltanto un abbassamento del CTOD in shelf superiore di entità pari al 25%, mentre rimane invariata la temperatura di transizione.

Anche per il materiale base è stato verificato in più casi che l'influenza della variazione del carico ultimo di cricatura, nei



limiti esplorati, risulta non significativa sul risultato del CTOD.

#### 4. - CONCLUSIONI

Dai risultati delle prove di CTOD è possibile trarre le seguenti conclusioni.

E' consigliabile, compatibilmente con le dimensioni dei tubi, non eseguire l'operazione di raddrizzamento dei campioni di prova sia per l'effetto negativo che questa operazione provoca sulla misura della tenacità in ZTA, sia per l'insorgere di indesiderate tensioni residue sullo spessore che provocano una notevole distorsione del fronte di avanzamento della cricca di fatica.

L'operazione di precompressione sullo spessore risulta invece necessaria per campioni con intaglio in ZTA e comunque per tutti i casi in cui sono state eseguite operazioni di raddrizzamento, per ottenere un fronte della cricca entro i limiti della normativa.

Inoltre, l'influenza della variazione di parametri di prova, quale carico ultimo di fatica e velocità di spostamento della traversa, non è risultata significativa sul risultato del CTOD, entro i limiti esplorati nel presente lavoro.

Gli autori ringraziano l'Ing. S. Venzi della soc. SNAM per il contributo fornito nella fase impostativa del lavoro ed il Sig. C. Brestolli (CSM) per la conduzione delle prove.



## BIBLIOGRAFIA

- 1) J.G. BLAUDEL and W. BURGET - CTOD Testing of Weld. Proc. of Work on the CTOD Method. Geesthacht, German - April 23-25, 1985 ISBN, pag. 225.
- 2) J.D. HARRISON - COD Testing and analysis the present state of the art the welding Institute, 1981.
- 3) C.W. MACGREGOR - The significance of residual stresses. Residual Stresses Publishing Corporation, N.Y. 1954.
- 4) H.G. PISARSKI, M.G. DAWES - The Weld. Instr., rapp. 7302.09/80/206.3, June 1980.
- 5) D.L. TOWERS et al. - The Welding Inst. Research Bulletin, April 1982.
- 6) M.G. DAWES - Procedura operativa per la determinazione del COD in presenza di pop-in, Genn. 87.
- 7) M. IINO, H. MIMURA, N. NOMURA - Transactions ISIJ, Vol. 18, 1978, p. 33.
- 8) P. FARSETTI, P. BUFALINI - Metal Construction, August 1981, p. 464.
- 9) B.L. BRANFITT and A.R. MARDER - Metallurgical Transaction, Vol. 8A, August 1977, 1263.

Roma, Aprile 1988  
SB/AP/LR/ps

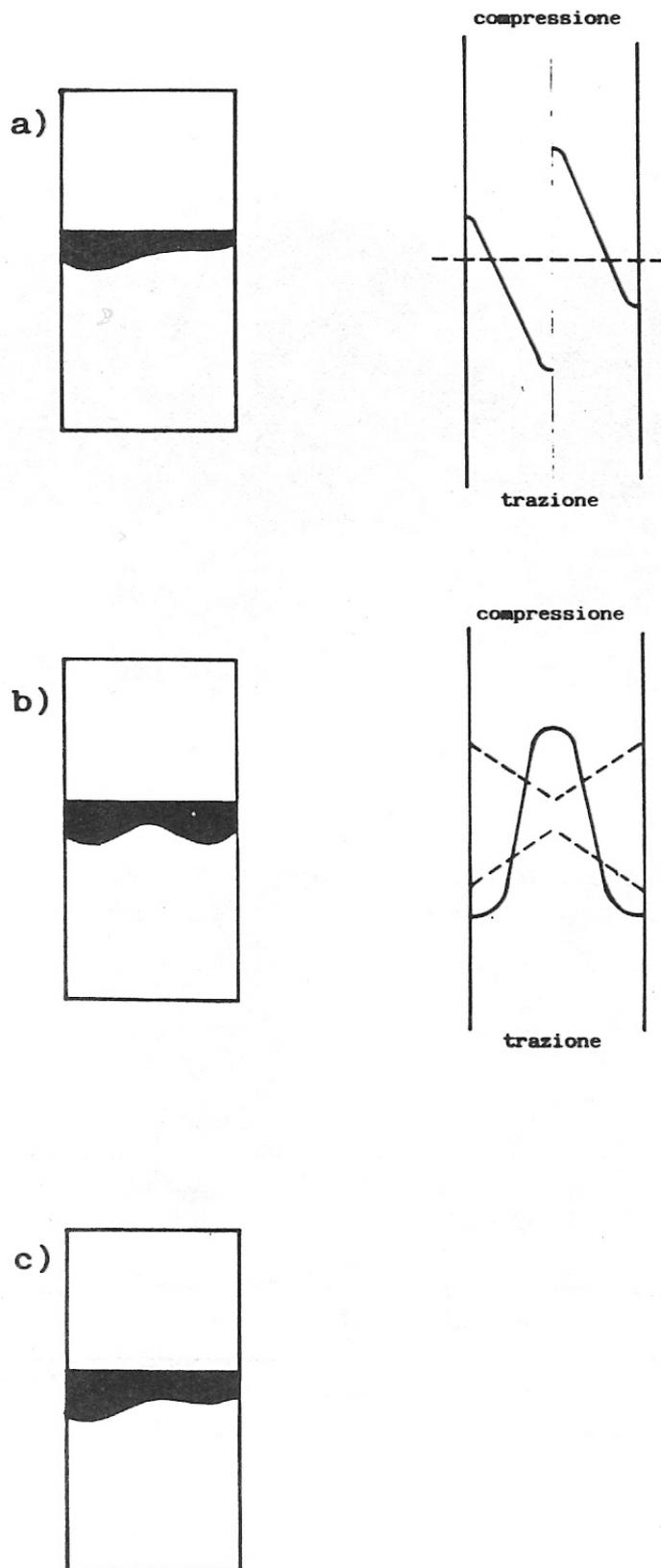


FIG. 1 - Schematizzazione del fronte della cricca di fatica distorto dalla presenza di tensioni residue.

- a) Provetta TPB (TL) raddrizzata.
- b) Provetta TPB con intaglio in ZTA.
- c) Provetta TPB (TL) con intaglio in ZTA e raddrizzata.

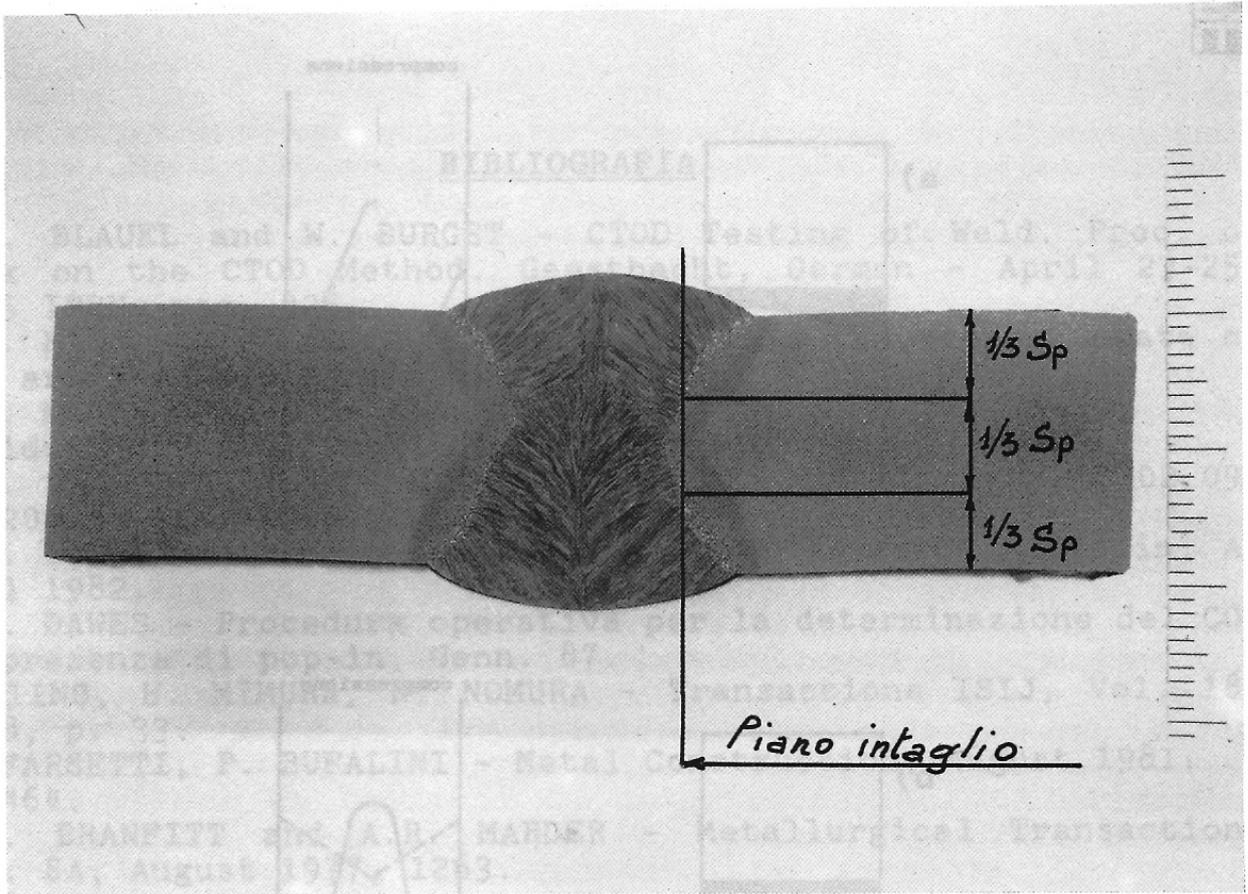


FIG. 2 - Posizione dell'intaglio di macchina realizzato su campioni di prova prelevati in ZTA.

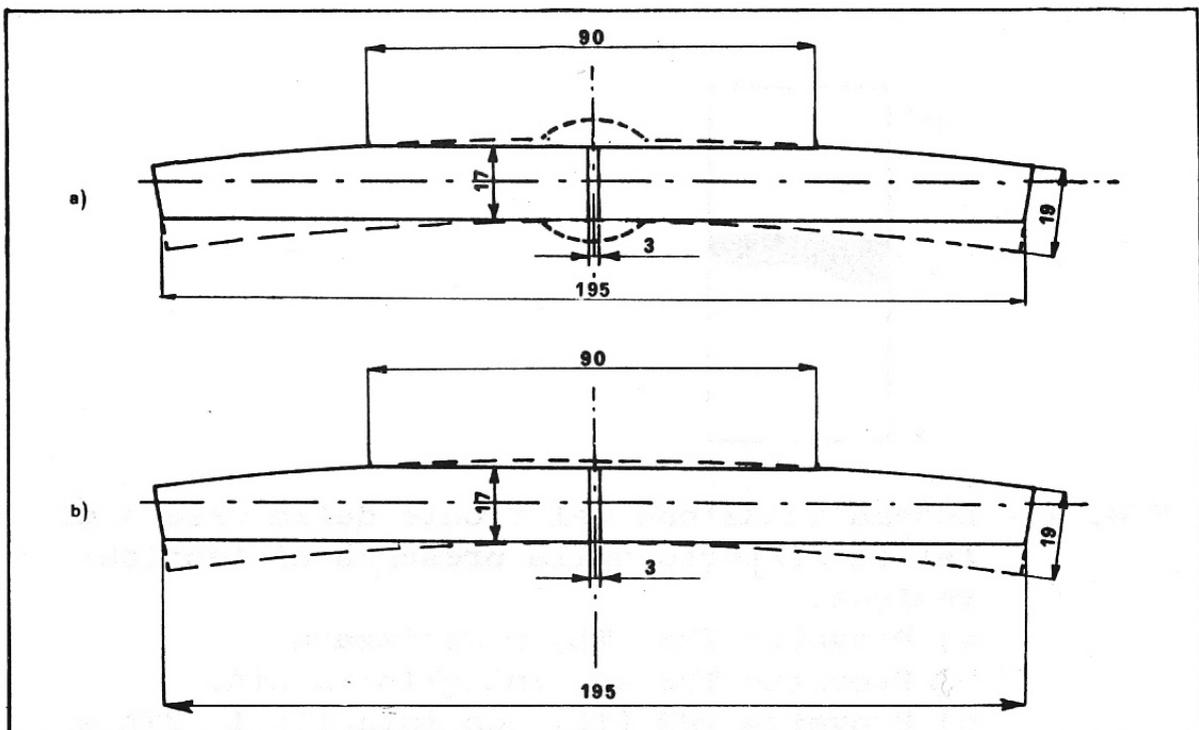


FIG. 3 - Geometria dei campioni di prova curvi prelevati in materiale ZTA (a) e materiale base (b). Provette TPB orientazione TL.

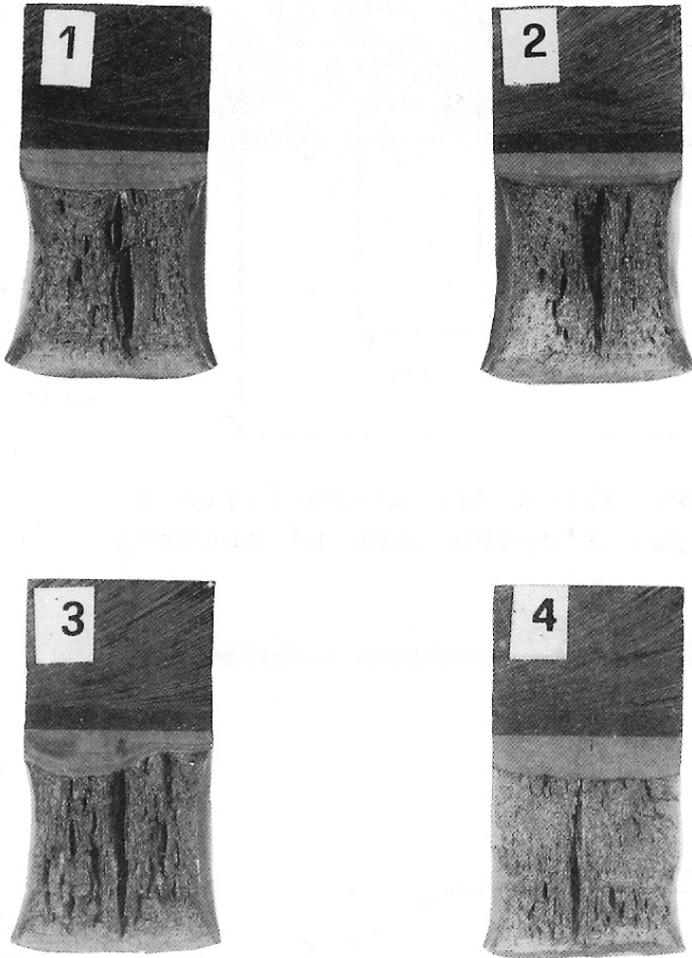


FIG. 4

Fronte della cricca di fatica su provini prelevati da materiale base.

1. Provino curvo
2. Provino curvo compresso
3. Provino raddrizzato
4. Provino raddrizzato e compresso.

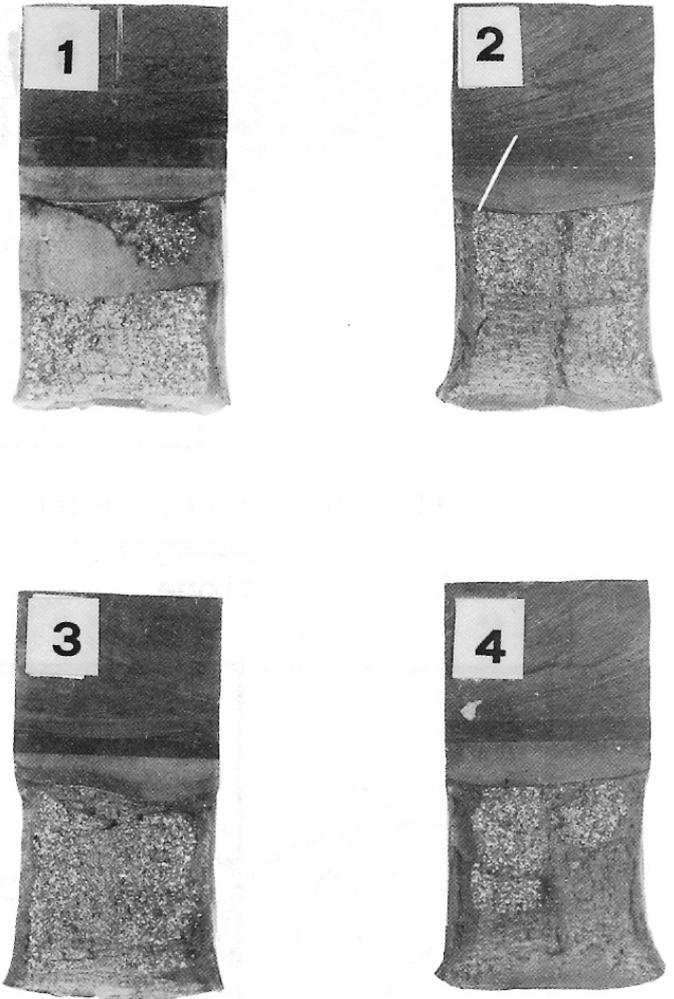


FIG. 5

Fronte della cricca di fatica su provini prelevati in ZTA.

1. Provino curvo
2. Provino curvo compresso
3. Provino raddrizzato
4. Provino raddrizzato e compresso.

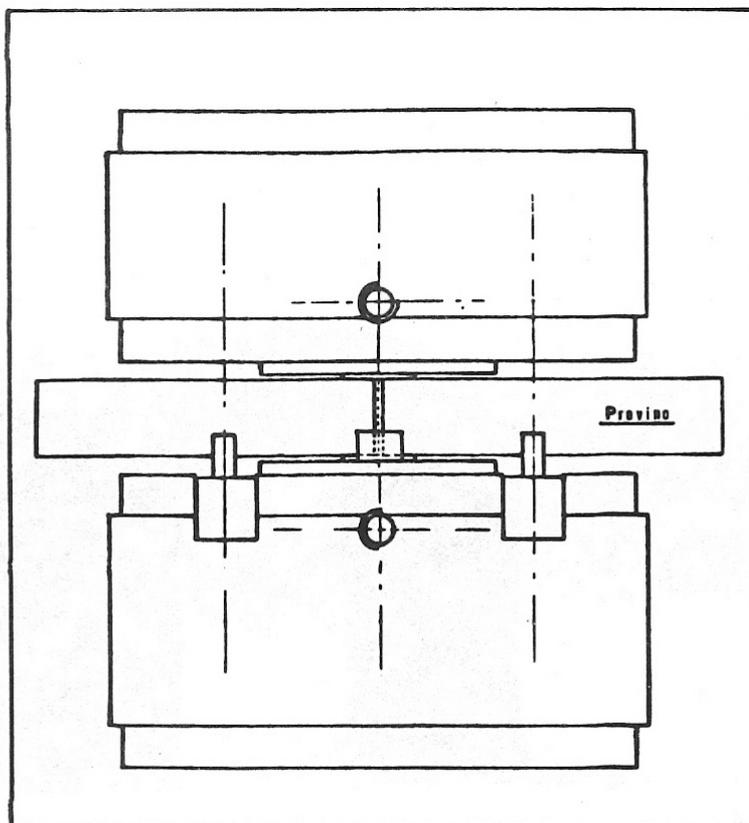


FIG. 6 - Rappresentazione schematica del dispositivo a punzoni utilizzato per l'operazione di compressione.

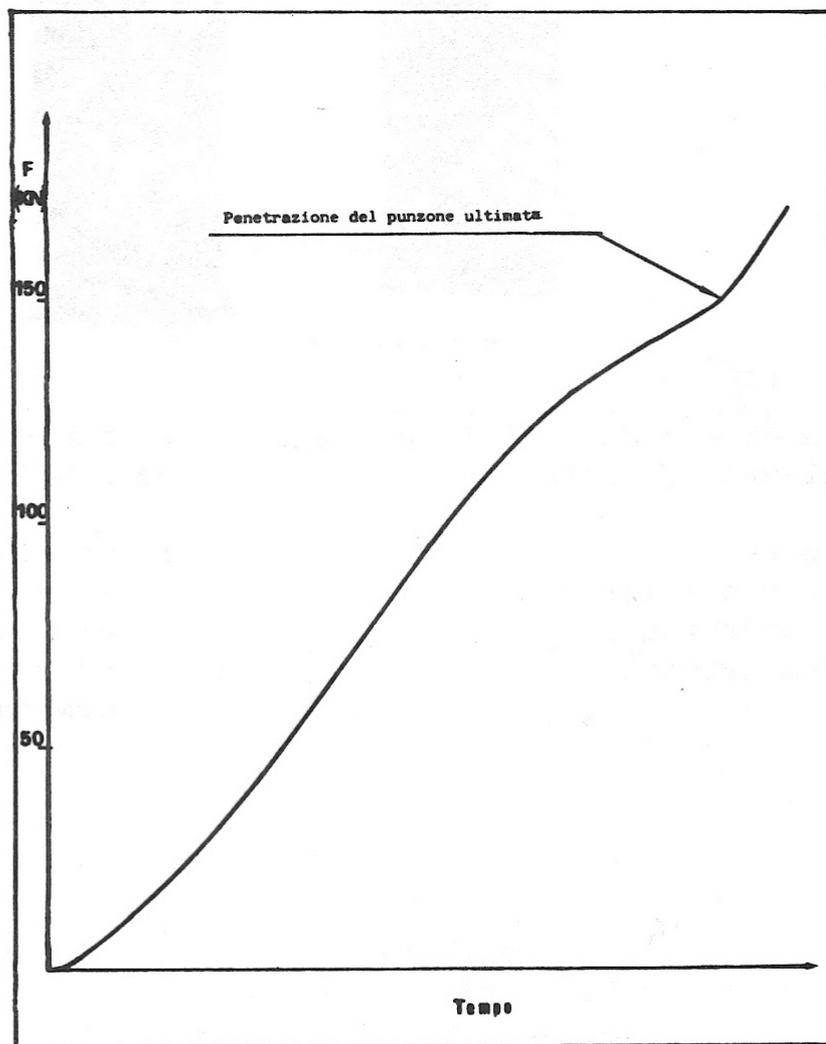


FIG. 7 - Andamento del carico in funzione del tempo durante l'operazione di compressione dei campioni di prova.

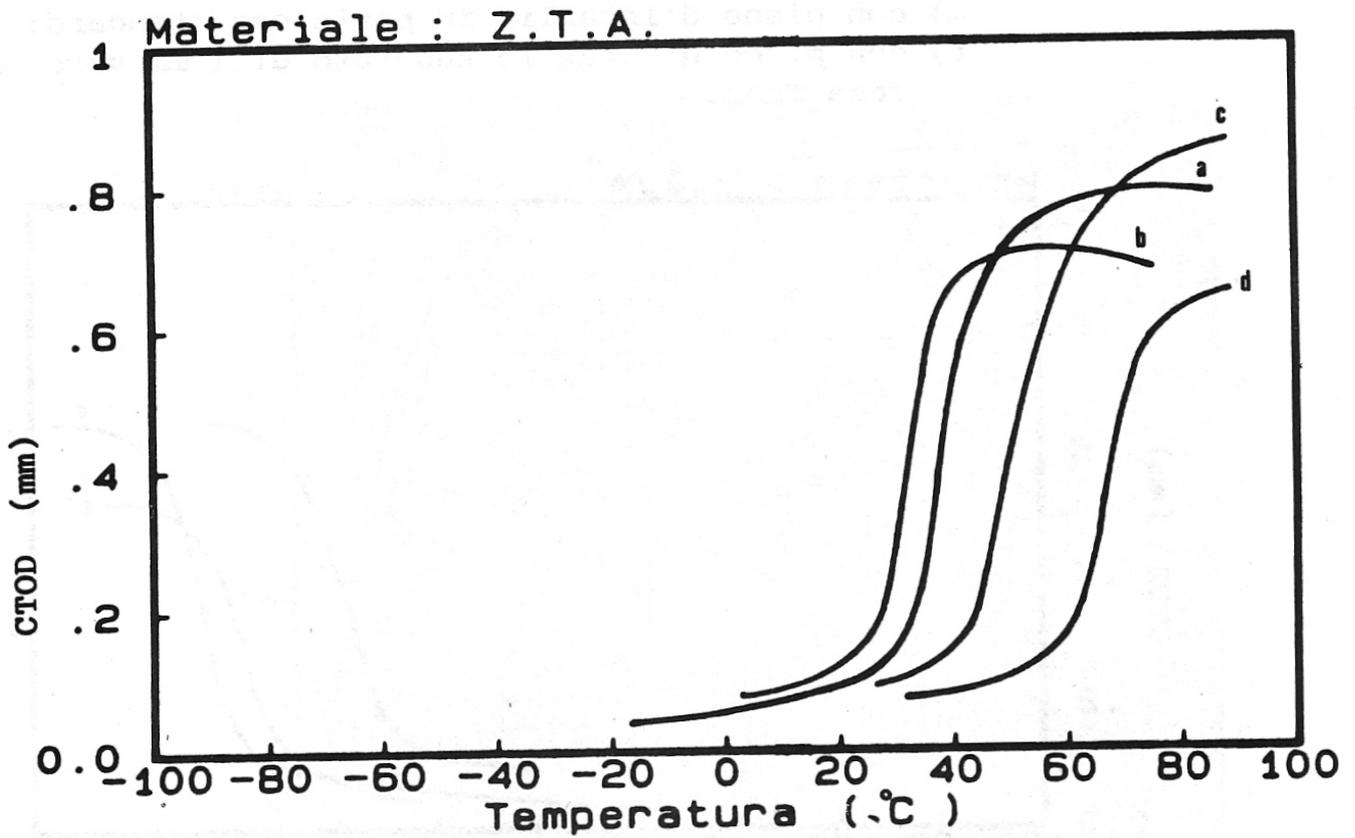
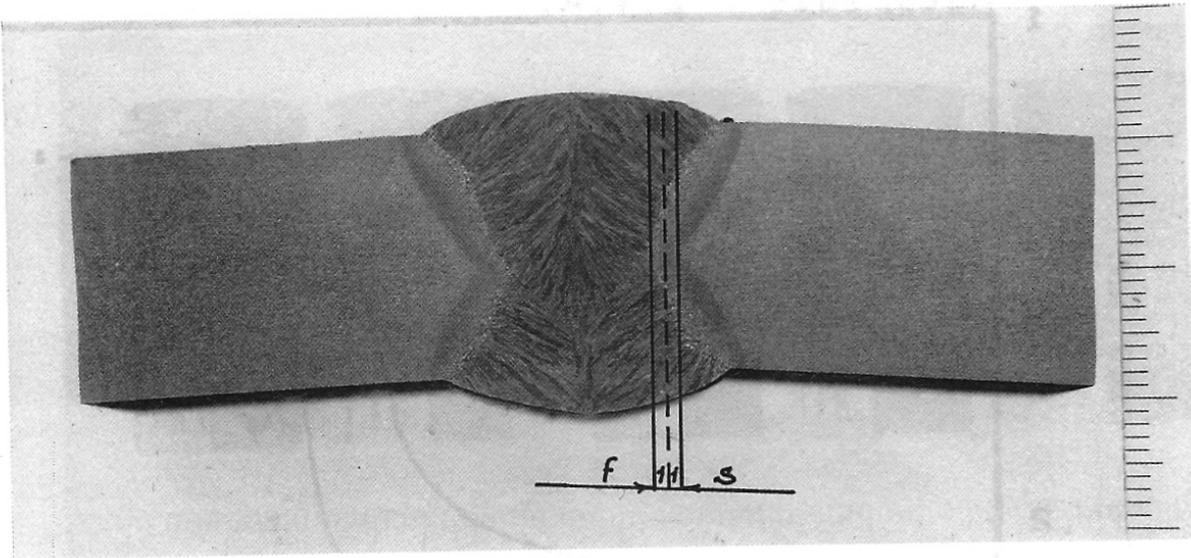


FIG. 9 - Curve di transizione del CTOD ottenute su provini ricavati da ZTA:  
a) curvo;  
b) curvo compresso;  
c) raddrizzato;  
d) raddrizzato compresso.

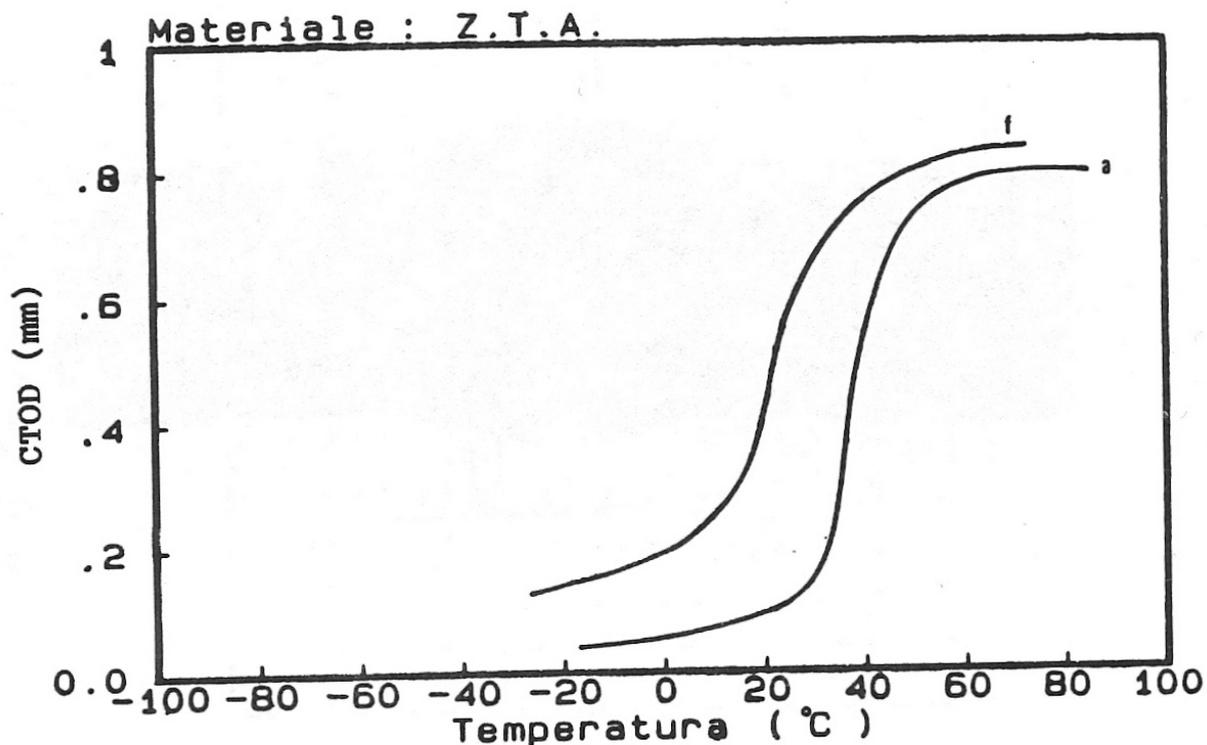


FIG. 10 - Curve di transizione del CTOD ricavate da provini curvi:  
a) con piano d'intaglio in posizione standard;  
f) con piano d'intaglio spostato di 1 mm verso la zona fusa.

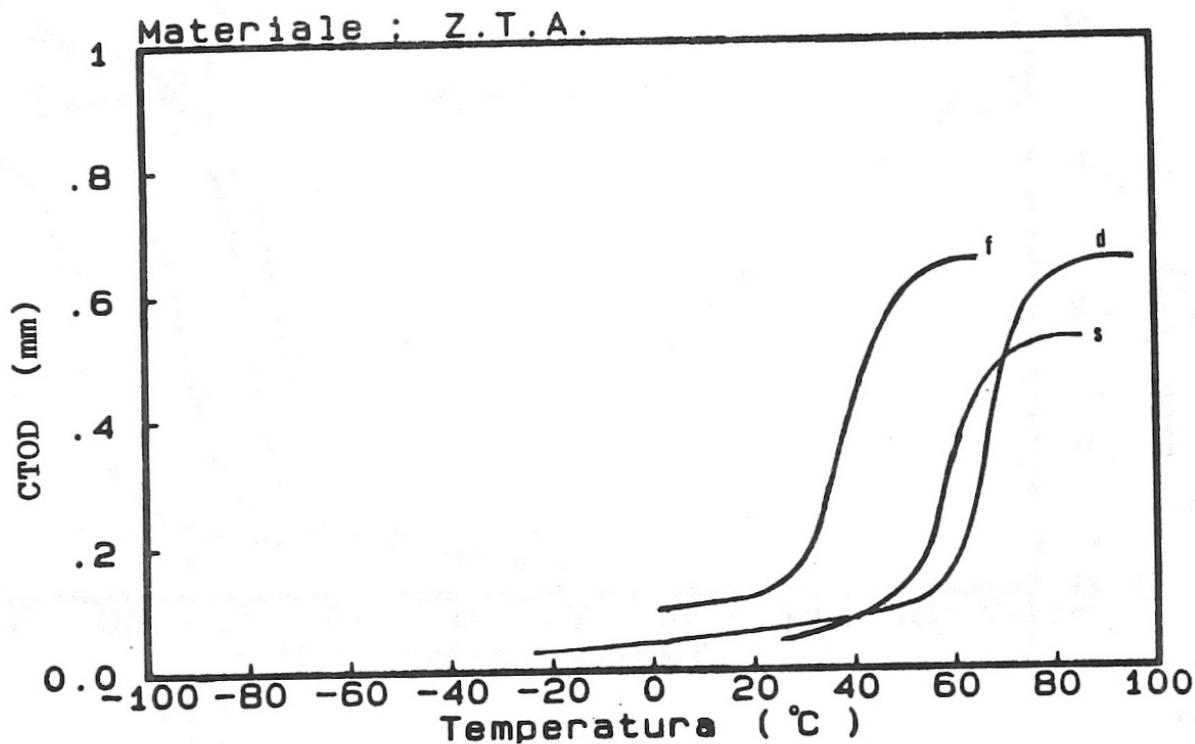


FIG. 11 - Curve di transizione del CTOD ricavate da provini raddrizzati e compressi, con piano d'intaglio in:  
d) posizione standard;  
f) spostato di 1 mm verso la zona fusa;  
s) spostato di 1 mm verso il materiale base.

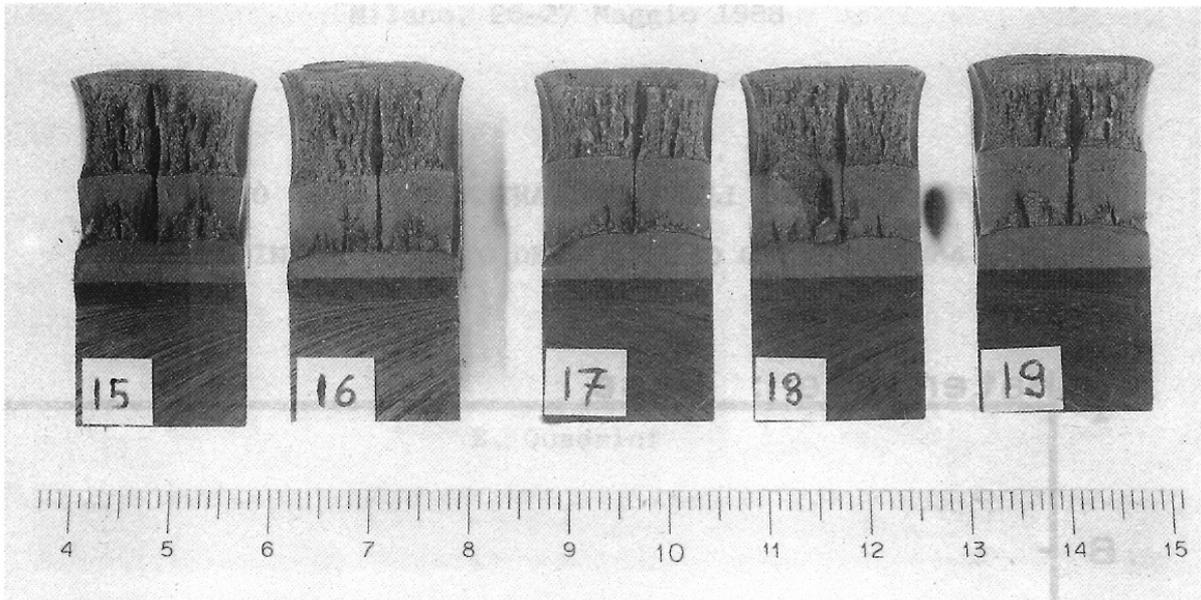


FIG. 12 - Superfici di frattura di alcuni provini in materiale base con presenza di separazioni.

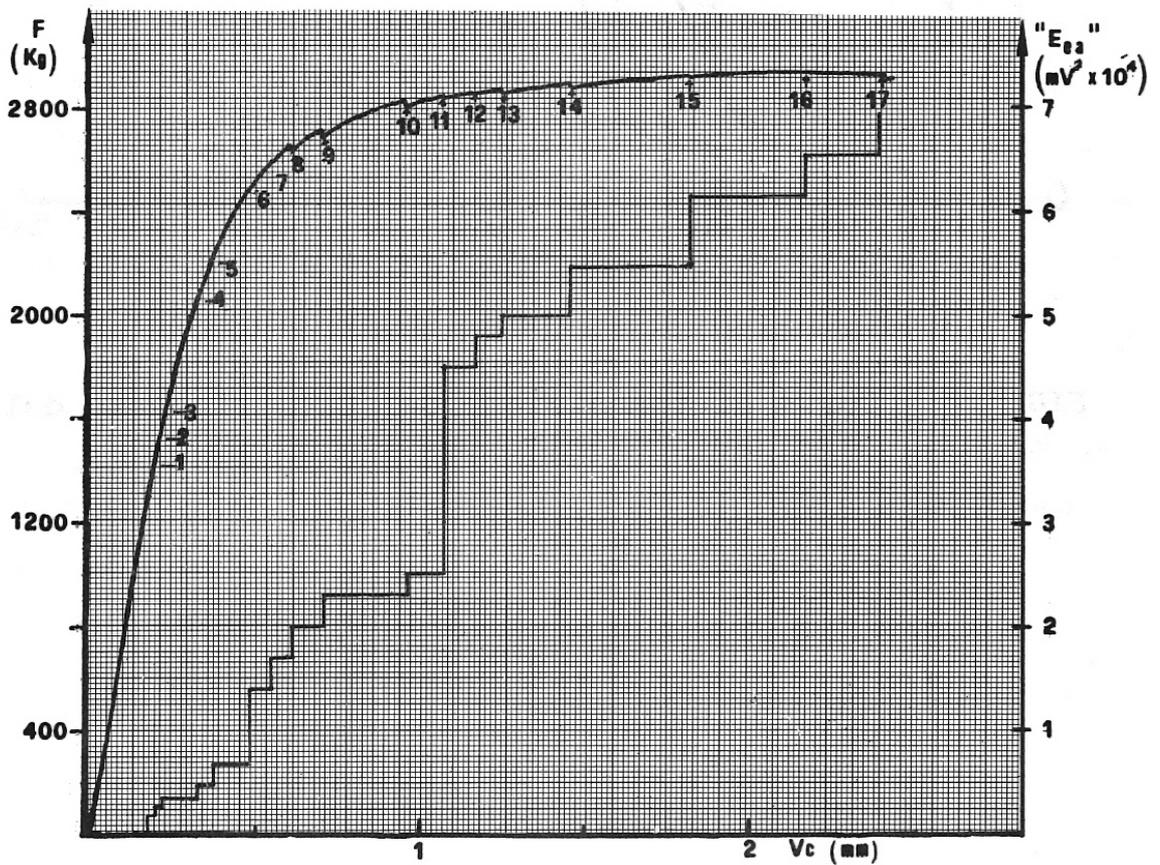


FIG. 13 - Confronto tra andamento del carico ed energia E.A., durante una prova di CTOD eseguita su materiale base che presenta formazione di separazioni.

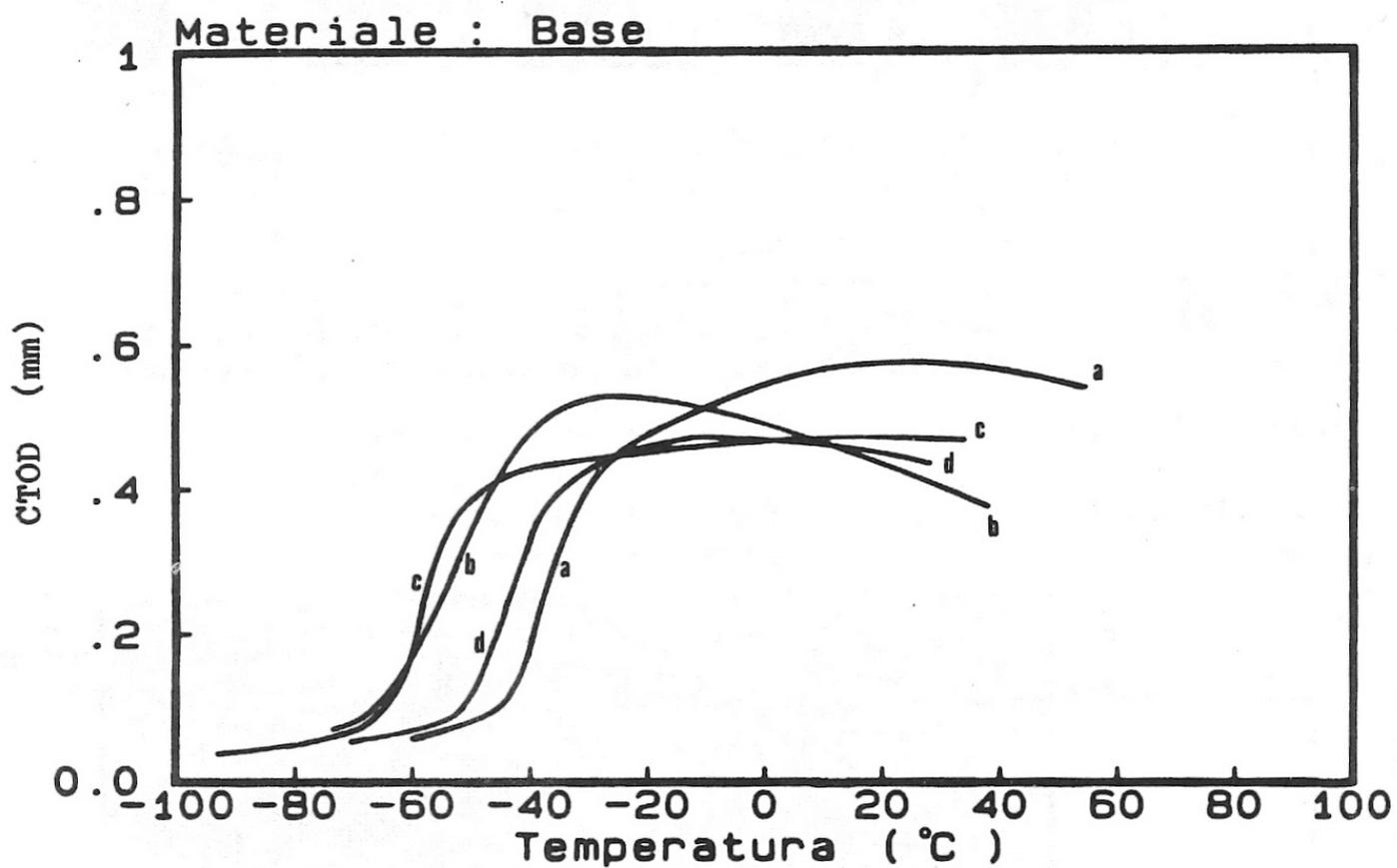


FIG. 14 - Curva di transizione del CTOD ricavate dal materiale base, su provini:

- a) curvo;
- b) curvo compresso;
- c) raddrizzato;
- d) raddrizzato e compresso.