

GRUPPO ITALIANO FRATTURA
V° CONVEGNO NAZIONALE
TRENTO 8-9 GIUGNO 1989

VALUTAZIONE DELLA TENACITA' ALLA FRATTURA DI UN GIUNTO SALDATO
IN ACCIAIO AL C-Mn

Dolfi F.°, Piovanelli P.°, Reale S.*

° Laboratorio Metallurgico e Tecnologico, NUOVO PIGNONE SpA, Firenze

* Università di Firenze, Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali.

SOMMARIO

La necessità di valutare la tenacità alla frattura di un giunto saldato può portare a problemi non indifferenti soprattutto se si vuole effettuare una valutazione rappresentativa di una situazione reale in cui non è prevista la distensione.

Per l'esecuzione delle prove sono stati realizzati talloni uguali ai giunti reali per geometria, materiali, e procedimento di saldatura.

I risultati di una prima serie di prove, effettuate secondo norma ASTM E813, hanno mostrato una situazione difficile da interpretarsi in modo coerente e non contraddittorio; in particolare non è stato possibile individuare un valore di J_c in modo conforme a quanto richiesto dalla norma.

E' stato ritenuto opportuno da un lato estendere la ricerca effettuando prove su talloni soggetti a diversi trattamenti termici e meccanici, dall'altro interpretare l'insieme dei risultati a disposizione anche attraverso le informazioni ottenute da analisi frattografiche effettuate al SEM.

L'attività svolta ha consentito di dare risposte ingegneristicamente valide anche in condizioni non coperte dalla norma e comunque di stimare un limite inferiore alla tenacità alla frattura del giunto in esame.

INTRODUZIONE

Nel campo delle produzioni differenziate della Nuovo Pignone S.p.A., la caldareria di qualità occupa una parte rilevante negli stabilimenti di Massa e di Vibo. In questo ambito è nata la necessità, oggetto del presente lavoro, di valutare la tenacità a frattura ad una data temperatura (-13.5°C) di un giunto saldato.

L'attività si è sviluppata a seguito delle difficoltà, esaminate poi in dettaglio, di interpretare in modo coerente i primi risultati ottenuti su provini allo stato (as welded) eseguendo prove di J_c secondo ASTM e conseguentemente di individuare un valore di J_c con procedura conforme a quanto richie-

sto dalla norma.

Al fine di avere comunque delle indicazioni utili per una valutazione, anche se di massima, del valore della tenacità a frattura, si è ritenuto utile estendere ed approfondire l'indagine. Nell'impossibilità di variare le dimensioni del provino, data dalla geometria del giunto, o la temperatura di prova, fissata dalle condizioni di verifica, sono state prese in considerazione altre possibili condizioni metallurgiche del giunto stesso: è stata così valutata la tenacità del materiale dopo distensione e dopo un trattamento convenzionale di invecchiamento artificiale.

I presumibili effetti dovuti alla presenza di tensioni residue sono stati presi in considerazione effettuando prove su provini allo stato con precompressione laterale.

Il panorama dei risultati ottenuti ha consentito di individuare una possibile ipotesi interpretativa che vede risolvere le ambiguità riscontrate nell'analisi dei dati sperimentali attraverso un'indagine mirata delle superfici di frattura al SEM. E' stato quindi possibile stimare un valore cautelativo e ragionevolmente attendibile della tenacità a frattura.

PROCEDURA SPERIMENTALE

Il giunto saldato in oggetto collega il fondo di un recipiente con un bocchello; si tratta di una saldatura circonferenziale con cianfrino a 1/2V, in cui la prima passata è TIG con filo AWS ERBOS-G, mentre il riempimento viene effettuato con elettrodo AWS E7018.1. Il bocchello è in ASTM A105, mentre il fondo è in ASTM A516-60. Le composizioni chimiche e le caratteristiche meccaniche dei diversi materiali allo stato sono riportate nelle Tabelle 1 e 2 rispettivamente.

Per l'esecuzione delle prove sono stati costruiti dei talloni rappresentativi del componente reale per geometria, dimensioni e procedimento di saldatura. Le dimensioni del provino e le modalità di prelievo sono state condizionate dalla geometria del bocchello (Fig.1). I provini utilizzati sono CT15 con ligamento sia nella zona fusa (provini identificati con la sigla nZF) che nella zona termicamente alterata (provini identificati con nHAZ), individuate dopo spianatura, lucidatura e attacco chimico con reattivo Nital 20%.

La distensione è stata realizzata sui talloni alla temperatura massima e minima prevista da ASME Sect. VIII UCS 56.1 :

Trattamento 1	: 593°C	1h	(provini identificati con 593/n)
Trattamento 2	: 480°C	7h	(provini identificati con 480/n)

L'invecchiamento è stato realizzato sui provini CT seguendo le indicazioni di UNI 5446-76, relativa alla misura della suscettibilità all'invecchiamento; detto invecchiamento è consistito nell'applicazione a temperatura ambiente di una deformazione plastica del 10% seguita da una permanenza di 30' a 250°C (provini identificati con AGED/n).

La precricatura a fatica è stata effettuata in controllo di forza con $R=0.1$ su macchina servoidraulica Schenck da 40 kN. Nel caso di provini allo stato si è osservato una certa dissimmetria del fronte di avanzamento della cricca

che ha portato talvolta al non rispetto delle condizioni imposte in ASTM E813. Un certo numero di provini è stato precompresso lateralmente da entrambe le parti con deformazioni totali comprese tra lo 0.5 e l'1%, in accordo a quanto riportato in /1,2,3/.

La fase di trazione è stata eseguita in controllo di spostamento su macchina servoidraulica Schenck da 400 kN, in accordo a ASTM E813.

La temperatura di interesse, -13.5°C , è stata ottenuta con una camicia a circolazione di alcool e controllata con una termocoppia posizionata a metà spessore in prossimità dell'apice della cricca.

RISULTATI SPERIMENTALI

Caratteristiche meccaniche

Il giunto nelle diverse condizioni è stato esaminato in sezione per ottenere i valori delle durezza HV10 nelle differenti zone (Fig. 2).

Da questi risultati, sulla base di considerazioni suggerite in /1/, sono stati ottenuti valori indicativi della tensione di snervamento e di rottura riportati in Tab.3.

Provini allo stato

In tutti i provini ZF durante la fase di carico si è osservato una notevolissima "apertura" del provino nella direzione di applicazione del carico, che ha dato luogo a diagrammi di carico del tipo mostrato in Fig. 3. Il valore di J e dell'estensione dell'avanzamento, misurati secondo ASTM, sono riportati in Fig. 4. Si può osservare che tutti i punti stanno con ridottissimo scarto su una retta di pendenza $2\bar{\sigma}$ - i valori di σ_y e σ_u sono in questo caso ottenuti da una misura diretta -; i provini precompressi hanno mostrato un comportamento regolare all'aumentare del J applicato, manifestandosi rottura instabile solo per J superiori ad un certo valore computabile in circa 500 kJ/m^2 ; i provini non precompressi hanno mostrato invece un comportamento irregolare, avendo mostrato la possibilità di rottura in tutto un intervallo compreso tra un J minimo di 160 kJ/m^2 e un J massimo di oltre 500 kJ/m^2 . Si osserva inoltre che, tranne che per i provini 1ZF e 10ZF che hanno dato luogo a fratture "precoci", non è stata rispettata la condizione:

$$b, B > 15J/\bar{\sigma}$$

in quanto J è risultato troppo elevato per lo spessore a disposizione.

Nei provini HAZ non si è rilevata differenza tra provini precompressi lateralmente e non, e in nessun caso si è avuta rottura fragile. Essendo evidente la maggior duttilità della zona termicamente alterata rispetto alla zona fusa, confermata anche da precedenti prove di resilienza /4/, la prima non è stata ulteriormente indagata.

Provini invecchiati

Una curva di carico tipica di questa condizione è riportata in Fig. 3. Il comportamento è di tipo fragile, e coerentemente si hanno piccoli avanzamenti prima della rottura e bassi valori di J .

Provini distesi

Nonostante le differenti durezza misurate, che testimoniano la non equivalenza dei due trattamenti di distensione, questi hanno dato comportamenti alla frattura dello stesso tipo.

Una curva di carico tipica è riportata in Fig. 3. Sul piano $J - \Delta a_p$ (Fig. 4) si ottengono punti più dispersi rispetto ai provini allo stato, ma globalmente considerabili allineati lungo una retta di pendenza $2\bar{\sigma}$, considerando anche l'incertezza nella valutazione delle tensioni di snervamento e rottura.

In queste condizioni non si rispettano mai le condizioni di validità del J per l'esiguità dello spessore e del ligamento dopo precricatura.

ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

Da una prima analisi del comportamento dei provini ed in particolare di quelli allo stato, appare una evidente difficoltà a conciliare il tipo di curva di carico (Fig. 3), che mostrerebbe un comportamento notevolmente duttile, ed una possibile ipotesi di curva R, tipica di materiali fragili, costituita per un primo tratto dalla blunting line con pendenza $2\bar{\sigma}$ e per un secondo tratto orizzontale a J costante pari a J_c ; questo considerando l'avanzamento misurato esclusivamente come arrotondamento all'apice della cricca, come suggerito dalla distribuzione dei punti sperimentali.

D'altro lato è opportuno tenere in debito conto, anche se solo in modo qualitativo, l'interdipendenza tra la duttilità del materiale e il ridotto spessore del provino - come evidenziato dal non rispetto dei limiti dimensionali imposti dalla norma - e le sue conseguenze sia in termini di pendenza della curva R, sia più in generale in termini di non completa idoneità del parametro J a descrivere l'avanzamento di una cricca in particolari condizioni limite.

Tali considerazioni hanno suggerito un'ulteriore ipotesi interpretativa che contempla comunque la presenza di un certo avanzamento della cricca successivo alla fase di blunting e che considera la curva R, per il tratto relativo all'avanzamento, di pendenza elevata e simile alla retta di blunting.

Ciò giustifica la disposizione dei punti sperimentali nel piano $J - \Delta a_p$ e la non possibilità di valutare da questi il J_c come punto di intersezione tra la retta di blunting e quella di avanzamento.

Quindi l'indagine si è spostata all'identificazione per via diretta tramite l'esame al SEM del passaggio tra la fase di blunting e quella di avanzamento. Il valore di J_c potrà essere poi valutato sulla retta di blunting dopo avere quantizzato l'estensione della stretched zone.

OSSERVAZIONE AL SEM

Le superfici di frattura sono state esaminate al microscopio elettronico a scansione tipo Cambridge Stereoscan 250.

Gli elementi principali dell'osservazione al SEM possono essere così sintetizzati:

- nei provini invecchiati, a comportamento più fragile, si può osservare un passaggio piuttosto netto della zona di fatica alla zona di stiramento (computabile in $30 + 50 \mu\text{m}$ di ampiezza), al termine della quale si evidenzia una sottilissima striscia di dimples (da 0 a circa $50 \mu\text{m}$) sostanzialmente equiassici seguita da clivaggio (Figg. 5 e 6). L'ampiezza della stretched zone si può ritenere sensibilmente costante lungo lo spessore.
- nei provini allo stato, al termine della zona per fatica comincia un piano inclinato di circa 45° rispetto alla direzione di carico, costituito da una prima parte di stiramento "puro", e da una parte in cui lo stiramento coesiste con zone di dimples molto stirati sempre più abbondanti allontanandosi dal fronte di fatica. La zona in cui si può osservare una certa predominanza di stiramento, in prima approssimazione costante sullo spessore e per tutti i provini, può essere computata in $100 + 200 \mu\text{m}$. Al termine della zona completamente a dimples stirati, si osserva un tratto di dimples sostanzialmente equiassici di estensione ridottissima nel provino più fragile (provino 1ZF, Fig. 7) ed estesa con forte unghiatatura fino a $600 \mu\text{m}$ nei provini più duttili (Fig. 8).

In taluni provini durante la fase di trazione si è avuta la rottura, sempre di clivaggio.

- nei provini distesi si ha una situazione simile a quella rilevata nei provini allo stato con comportamento più duttile. Lo stiramento "puro" è ridottissimo e si ha un passaggio graduale tra stiramento e dimples allungati; l'intero piano a 45° è occupato da dimples allungati, tranne poche zone circoscritte in cui si hanno dimples equiassici (Fig. 9).
- caratteristica costante di tutti i provini è l'arretramento della zona di stiramento a coinvolgere l'ultima parte della propagazione per fatica, come già osservato su acciai HSLA in /5/, e visibile in Fig. 10.

Globalmente quanto osservato al SEM conferma una non netta distinzione fra le diverse fasi del fenomeno di propagazione della cricca dall'avanzamento per fatica alla frattura, come riscontrato anche nell'elaborazione dei risultati in termini di J.

Si può evidenziare come per grandi linee si abbia un passaggio graduale nelle modalità di frattura dalla condizione più fragile (materiale invecchiato) alla più duttile (materiale disteso). Caratteristica di questo passaggio è la sempre meno evidente distinzione tra le diverse zone di avanzamento, che porta per il materiale disteso ad una praticamente completa indecifrabilità dei limiti di esistenza o anche solo di predominanza delle diverse zone.

In conclusione, per il caso di interesse - materiale allo stato - l'osservazione al SEM ha consentito di effettuare una stima ragionevolmente attendibile dell'entità media della stretched zone in $150 \mu\text{m}$.

CONCLUSIONI

Il valore dell'entità della stretched zone ottenuto dall'osservazione al SEM ha consentito di effettuare la richiesta valutazione della tenacità a frattura del giunto saldato; riportando detto valore sulla blunting line è stato stimato un J_c di 160 kJ/m^2 .

Tale valore corrisponde al J a rottura misurato sul provino 1ZF, che ha dato il valore minimo fra tutti i J a rottura. Per tale provino si ha una ridottissima propagazione stabile e tutta l'estensione della cricca dopo la fatica può essere attribuita al blunting; inoltre vengono rispettate le condizioni sulle dimensioni richieste dalla norma per la validità del J . La curva R può quindi essere considerata come una spezzata con un tratto orizzontale, data la sostanziale fragilità di comportamento. Il valore di J a rottura per questo particolare provino corrisponde al J_c di inizio propagazione, confermando la stima di tenacità a frattura ottenuta tramite l'esame dei provini al SEM.

L'attendibilità del valore di J_c trova ulteriore conferma in una verifica effettuata, sempre per 1ZF, in accordo a quanto suggerito in /6/ nel caso di frattura instabile e curva di carico non lineare.

Per quanto riguarda gli altri provini allo stato, le rotture precoci avvenute soltanto in provini non precompressi lateralmente, possono essere interpretate come effetto delle tensioni residue presenti in distribuzione ed entità difficilmente prevedibili e non necessariamente ripetibili. In loro assenza, o neutralizzazione di effetti tramite precompressione laterale, la rottura avviene solo per J molto elevati.

Il valore di J_c stimato per il materiale allo stato risulta come prevedibile superiore rispetto a quello del materiale invecchiato e inferiore rispetto a quello del materiale disteso, per il quale peraltro l'esame al SEM non ha dato indicazioni utili e gli elevati valori di J suggeriscono l'ipotesi di non rappresentatività delle prove effettuate ai fini di una stima attendibile di J_c .

BIBLIOGRAFIA

- /1/ Squirrell S.J. et al. "Recommended procedures for the Crack Tip Opening Displacement (CTOD) testing of weldments" The Welding Institute Research Report 311/1986, August 1986.
- /2/ Towers O.L., Dawes M.G. "Welding Institute research on the fatigue pre-cracking of fracture toughness specimens", ASTM STP 856, 1985, p.23-46
- /3/ Dawes M.G. et al. "Fracture mechanics measurements of toughness in welded joints" in Applied Fracture Mechanics, The Welding Institute 1982.
- /4/ Gentilini P., Tani F., "Prove di resilienza su cordone di saldatura" Rapporto interno 193/7/0839, 1987
- /5/ Luo L.G., Embury J.D. "An investigation of crack blunting processes under plane strain conditions", Engineering Fracture Mechanics (30) 1988, n.2, pp.177-190.
- /6/ Milne I. et al "Assessment of the integrity of structures containing defects" R/H/R6 Rev. 3, CEGB, 1986

TABELLA 1

COMPOSIZIONI CHIMICHE (%)

	C	Mn	Si	Mo	Cu	P	S
ER 80 S-G	0.099	1.17	0.59	0.48	-	0.016	0.014
E 7018.1	0.060	1.29	0.33	-	-	0.013	0.005
A105	0.17	1.12	0.29	-	0.22	0.007	0.011
A516-60	0.15	0.93	0.21	-	-	0.011	0.015

TABELLA 2

CARATTERISTICHE MECCANICHE
(materiale allo stato)

	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	A (%)
E7018.1	489+ 502	549 + 556	25 + 36
A105	372+ 410	521 + 526	29 + 32
A516-60	328+ 345	451 + 456	32 + 42

TABELLA 3

CARATTERISTICHE MECCANICHE STIMATE

		σ_y (MPa)	σ_u (MPa)
Materiale allo stato	HAZ	442	544
Materiale invecchiato	ZF	642	672
Materiale disteso 480°C	ZF	461	531
Materiale disteso 593°C	ZF	419	499

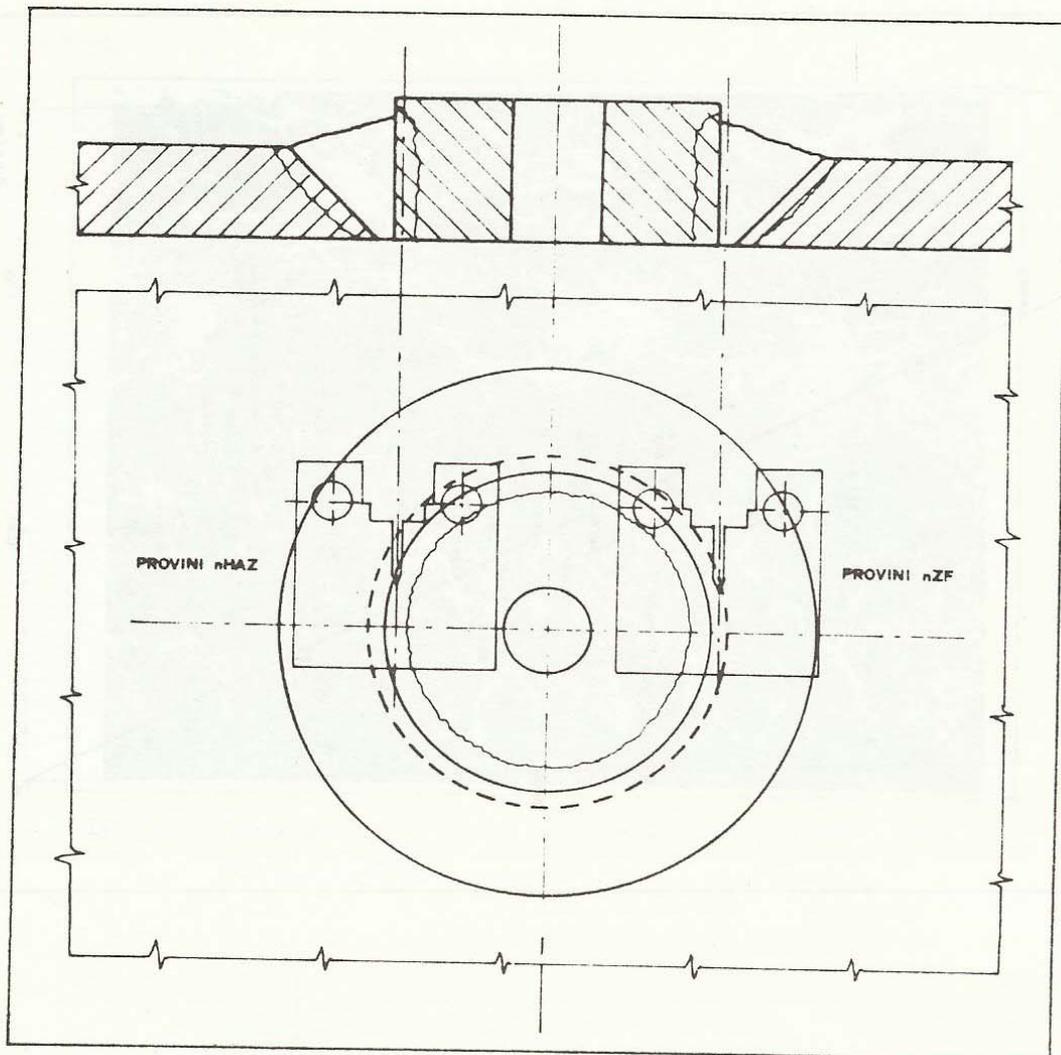


FIG. 1 - Geometria del tallone di prova

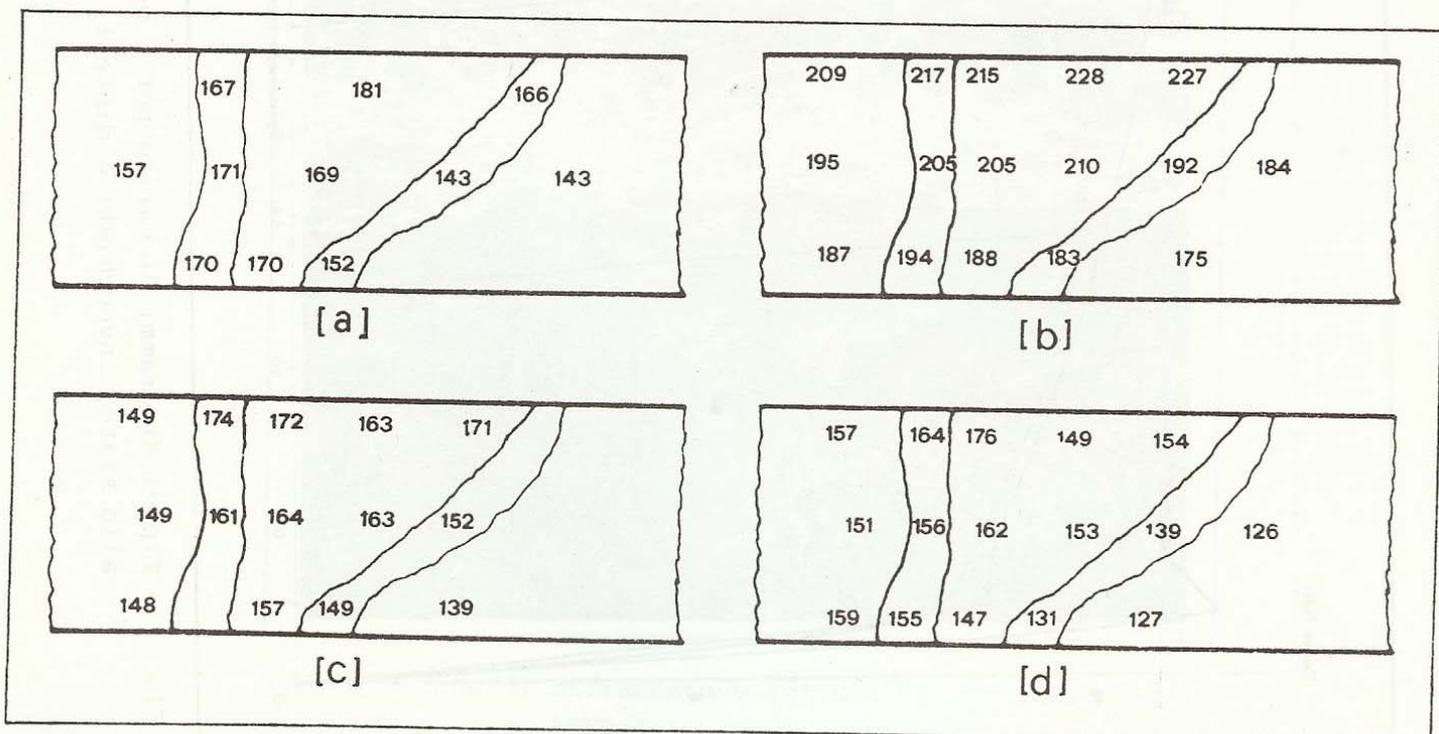


FIG. 2 - Durezze HV10 su materiale allo stato (a), invecchiato (b), disteso a 480°C (c) e a 593°C (d).

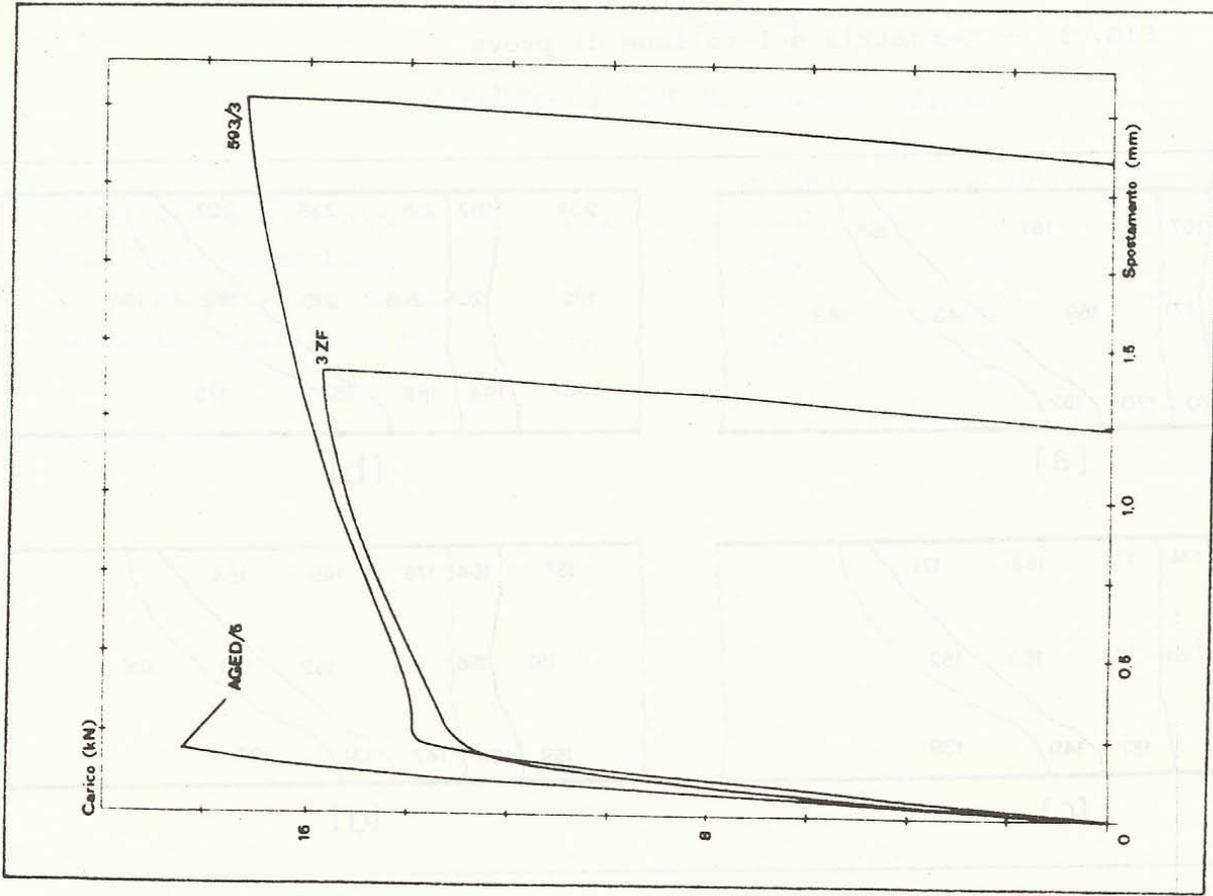


FIG. 3 - Tipici diagrammi di carico per i provini allo stato, invecchiati e distesi

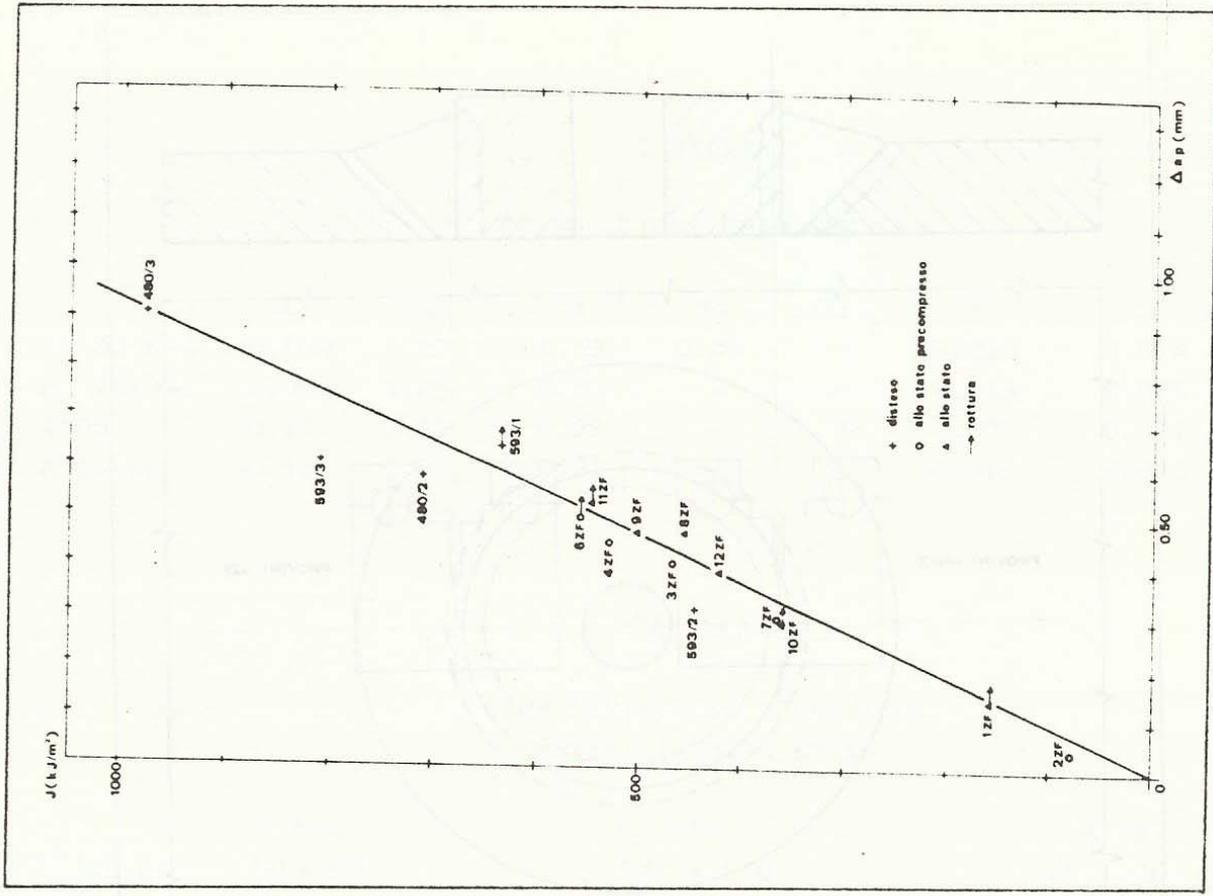


FIG. 4 - Diagramma $J - \Delta a_p$ per i provini allo stato e distesi

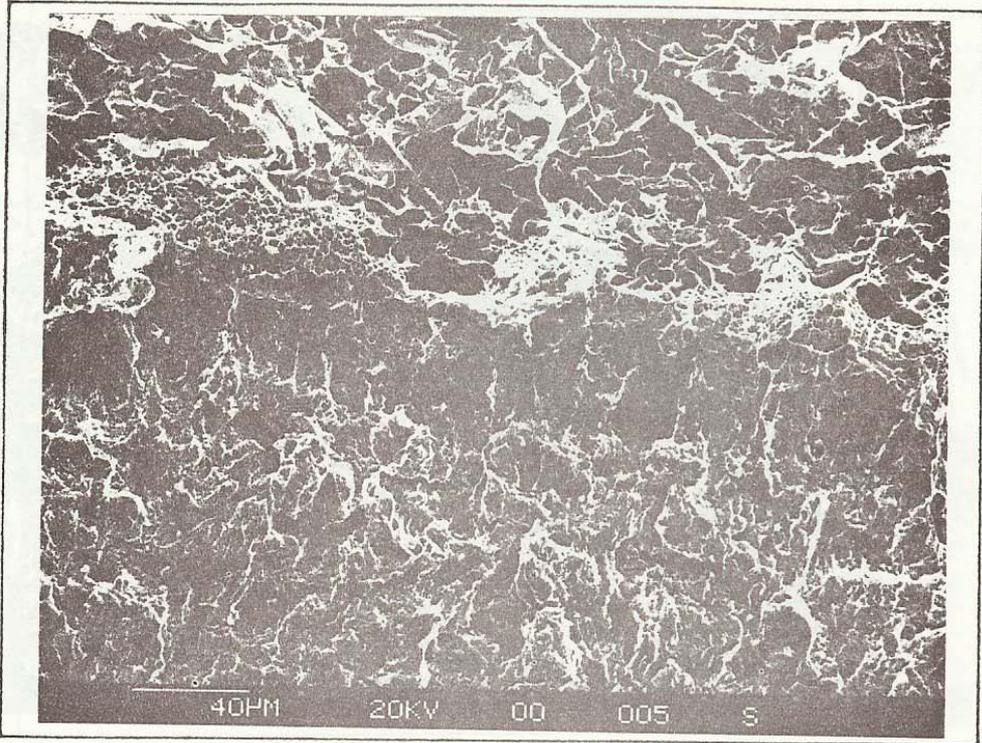


FIG. 5 - Zona di stiramento e rottura di clivaggio nel provino AGED/1

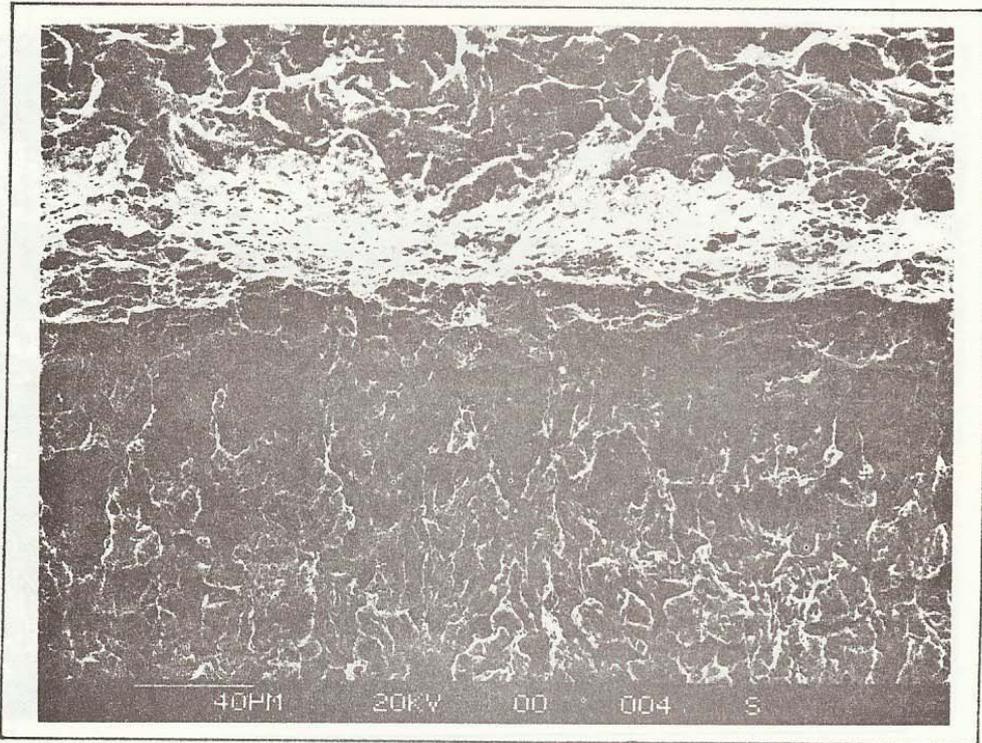


FIG. 6 - Zona di stiramento e rottura di clivaggio nel provino AGED/4

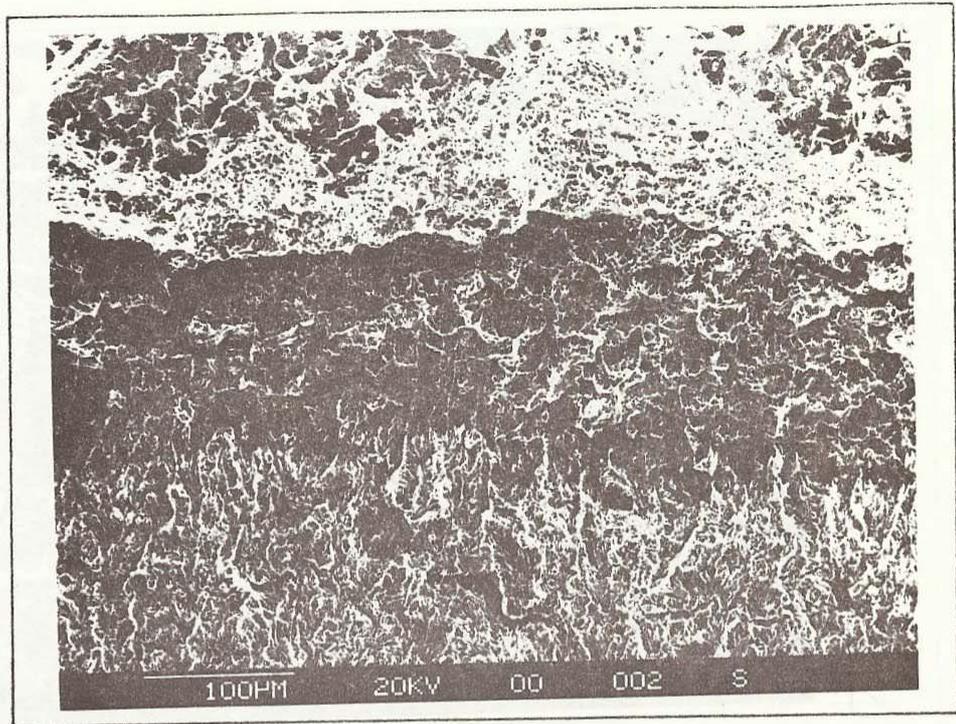


FIG. 7 - Zona di stiramento e rottura di clivaggio nel provino 1 ZF

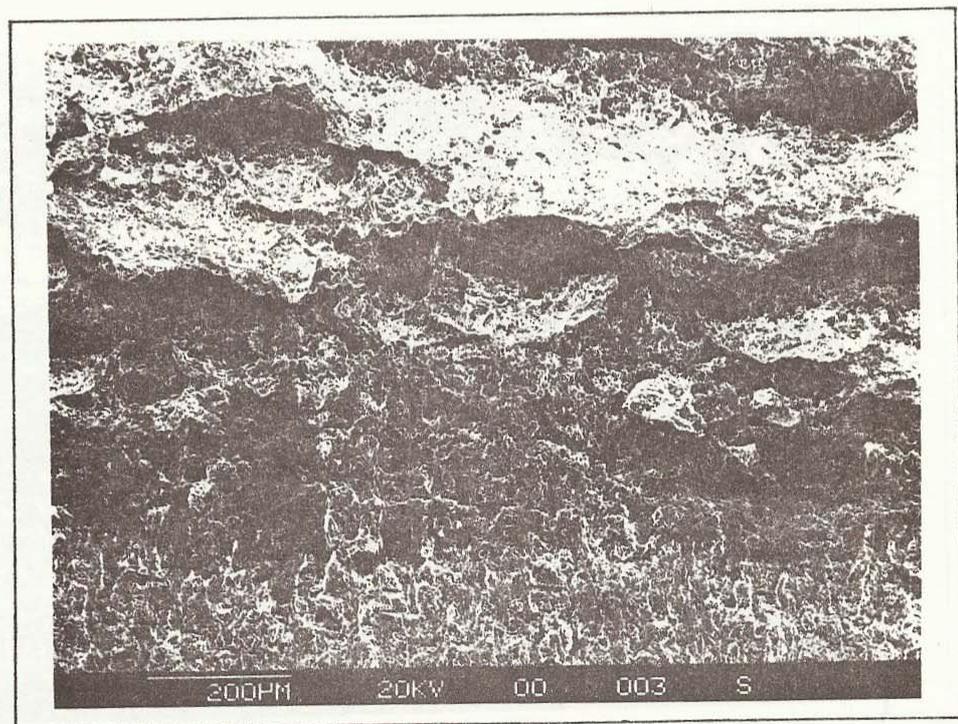


FIG. 8 - Zona di stiramento e propagazione duttile nel provino 6 ZF

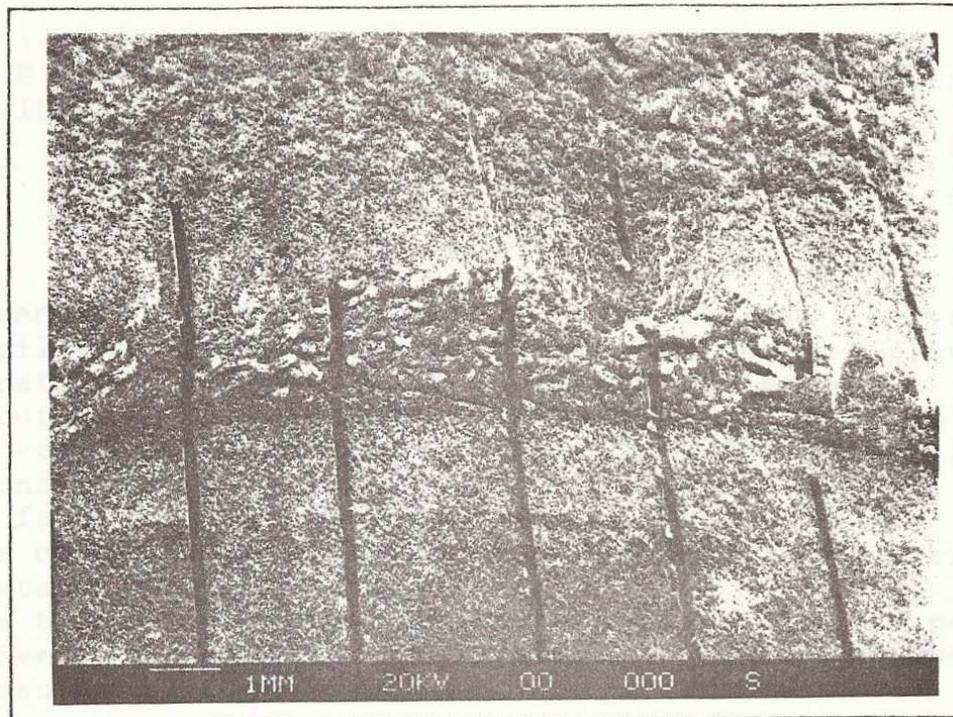


FIG. 9 - Rottura nel provino 480/3

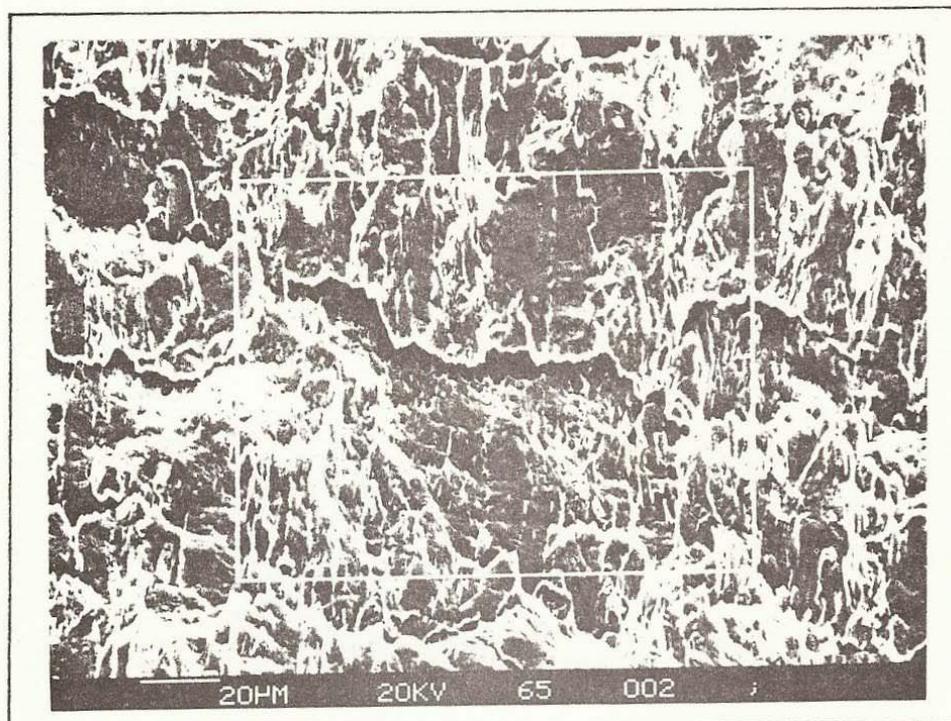


FIG. 10 - Zona di stiramento nel provino 593/3 che coinvolge l'ultima parte di propagazione per fatica.