

GRUPPO ITALIANO FRATTURA (IGF)**V Convegno Nazionale**

Università di Trento - Dip. Ingegneria

8-9 Giugno 1989

**PROPAGAZIONE DI CRICCHE PER FATICA NELLA LEGA
Ti-6Al-6V-2Sn: MODELLI DI PROPAGAZIONE ED ANALISI
FRATTOGRAFICA.**

A. La Barbera, M. Marchetti
Dipartimento Aerospaziale, Univ. "La Sapienza" Roma

Sommario

In questo lavoro sono riportati i risultati di uno studio sulla propagazione di cricche per fatica nella lega Ti-6Al-6V-2Sn. Particolare attenzione è stata data alla valutazione degli effetti del rapporto di carico sulle caratteristiche qualitative dei meccanismi di frattura e quantitative della velocità di propagazione.

I dati sperimentali sono stati interpolati mediante l'equazione di Forman a cinque costanti e di Collipriest. Si è riscontrata una buona capacità del modello di Forman ad interpolare velocità di propagazione al variare del rapporto di carico ($-0.4 \leq R \leq 0.5$), utilizzando le costanti di propagazione calcolate sulla base di dati relativi ad un prefissato valore di R.

L'analisi frattografica delle superfici di frattura ha mostrato la presenza di tre distinti meccanismi di frattura a seconda della lunghezza di cricca. L'effetto del rapporto di carico sui meccanismi di frattura è risultato evidente, provocando delle anticipazioni dei meccanismi stessi con l'eventuale scomparsa di alcuni di essi per elevati valori dell'ampiezza di carico.

1. Introduzione

La previsione deterministica della vita operativa di una struttura, o di un suo componente, secondo i criteri della meccanica della frattura lineare elastica, comporta la preliminare conoscenza di alcuni parametri caratterizzanti la criticità del difetto nella struttura (soluzioni del fattore di intensità degli sforzi) [1] e delle costanti di propagazione caratteristiche del materiale in analisi [2],[3]. Queste ultime vengono determinate sperimentalmente mediante prove di propagazione di cricche su appropriati provini, dimensionati in accordo a specifiche normative.

Scopo del presente lavoro è quello di caratterizzare la propagazione di cricche per fatica in una lega di titanio d'impiego aeronautico [4],[5]. Il materiale in oggetto viene utilizzato per la costruzione dell'attacco del pilone sub-alare di un velivolo d'addestramento leggero. La scelta di questo materiale è scaturita da considerazioni di resistenza e, data la scarsa conoscenza delle sue proprietà a frattura si è reso necessario uno studio completo del suo comportamento nei riguardi della propagazione di cricche per fatica.

I risultati sperimentali, espressi in termini di velocità di propagazione, opportunamente elaborati mediante alcuni tra i più classici e collaudati modelli semiempirici, hanno consentito di caratterizzare il materiale nelle diverse condizioni di carico.

Di notevole importanza, ai fini di un miglioramento delle proprietà del materiale, sono anche le analisi frattografiche che consentono di identificare i meccanismi di frattura [6]. Si possono in tal modo giustificare variazioni di caratteristiche delle curve di propagazione mediante variazioni o transizioni dei suddetti meccanismi a livello microscopico.

2. La Lega Ti-6Al-6V-2Sn e le Condizioni di Prova

La lega presa in esame è simile alla tradizionale Ti-6Al-4V, dalla quale è stata derivata aumentando gli elementi beta-stabilizzanti ed effettuando dei trattamenti di solubilizzazione-tempra-invecchiamento (STA).

L'aggiunta di elementi β -stabilizzanti, che presentano una solubilità maggiore rispetto agli α -stabilizzanti, permette di ottenere una lega con alte resistenze meccaniche, a scapito però della tenacità e della saldabilità.

Nella Tab.1 è riportata la composizione chimica della lega (specifiche MILT-9046J e 9047G) con alcune caratteristiche meccaniche.

Tab.1 Composizione chimica e proprietà meccaniche della lega Ti662 STA

Composizione %	σ_r MPa	σ_y MPa	E GPa	K_{Ic} MPam ^{1/2}	ρ g/cm ³
Al 5.0; Sn 1.5 V 5.0; Fe 0.3 C 0.05; N 0.04 O 0.20 altri 0.3 max	1030	970	113	60	4.5

In Fig.1 invece, è mostrata l'influenza della temperatura sulle caratteristiche di resistenza di alcune leghe di titanio; si può osservare che la Ti6-6-2 ha un comportamento migliore rispetto alla classica Ti6-4.

Poiché questo materiale viene utilizzato per la costruzione del supporto del pilone sub-alare del velivolo S211 della SIAI-MARCHETTI, le prove di propagazione sono state effettuate con cicli di carico quanto più fedeli possibili al reale spettro di carico del componente strutturale.

Ciò ha comportato una definizione dei parametri del ciclo (rapporto di carico R e Pmax) che fossero rappresentativi dell'intero spettro di carico.

Le prove di propagazione ad ampiezza di carico costante sono state quindi effettuate con i seguenti valori dei parametri:

- carico max: $P_{max} = 5.0 \div 6.0$ KN
- rapporto di carico: $-0.4 \leq R \leq 0.5$
- frequenza: $f = 8 \div 9$ Hz
- ambiente: aria di laboratorio

Le lunghezze di cricca sono state rilevate con un microscopio ottico a 40 ingrandimenti, su entrambe le facce dei provini CT dimensionati in accordo alle norme ASTM E647-81.

I provini sono stati ricavati tutti da uno stesso laminato con intaglio posto in direzione perpendicolare a quella di laminazione (LT).

In Tab. 2 sono riportate le prove effettuate con i diversi valori dei parametri del ciclo.

Tab.2 Prove sperimentali effettuate

Provino	R	Pmin KN	Pmax KN	f Hz
TT19	-0.40	-2.00	5.00	9.00
TT20	-0.40	-2.40	6.00	9.00
TT08	-0.30	-1.50	5.00	9.25
TT18	-0.30	-1.80	6.00	9.00
TT16	0.00	0.00	5.00	9.00
TT07	0.00	0.00	6.00	9.25
TT13	0.20	1.00	5.00	8.33
TT14	0.20	1.20	6.00	8.00
TT21	0.25	1.25	5.00	8.33
TT05	0.25	1.50	6.00	8.00
TT12	0.50	2.50	5.00	8.33
TT04	0.50	3.00	6.00	8.33

3. Risultati Sperimentali di Propagazione

L'effetto del carico massimo, a parità di R, sulla velocità di propagazione risulta evidente dalla Fig.2, dove vengono confrontate due prove con diverso Pmax. Si riscontra una traslazione della curva $\log(da/dN) - \log(\Delta K)$ verso intervalli più elevati di da/dN e di ΔK .

Analogamente, con valori di Pmax costanti, al variare di R si ha una traslazione delle curve di propagazione, risultando, a parità di ΔK , una velocità di propagazione maggiore all'aumentare del valore del rapporto di carico.

In Fig.3 sono riportate le curve di propagazione relative a diversi valori di R e per due distinti valori di Pmax.

I risultati sperimentali, espressi in termini di velocità di propagazione, sono stati interpolati con i modelli di Forman (equazione a 5 costanti) e di Collipriest.

Rimandando alla letteratura già esistente [2],[3],[7] per una più approfondita discussione di tali modelli, riportiamo per comodità le equazioni di Forman e Collipriest:

a) Forman :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(1-R)^m \Delta K^n (\Delta K - \Delta K_{th})^p}{((1-R)K_c - \Delta K)^q}$$

b) Collipriest :

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (K_{Ic} \Delta K_{th})^{n/2} \cdot \exp \left(\left(\ln(K_{Ic} / \Delta K_{th}) \right)^{n/2} \cdot \operatorname{arctch} \left(\ln(\Delta K^2 / A \cdot \Delta K_{th}) / \ln(A / \Delta K_{th}) \right) \right)$$

con

$$A = (1-R) \cdot K_{Ic}$$

$$\Delta K_{th} = (1 - R) \cdot K_0$$

K_0 = valore di soglia per $R=0$

Nell'equazione di Forman le costanti p e q sono state assunte entrambe pari a 0.5 poiché con tali valori il modello descrive in modo soddisfacente il tratto lineare della curva di propagazione. Il termine $(1 - R)^m$, che possiamo indicare come termine di traslazione, consente di svincolare l'equazione da ogni variabile eccetto che da R , caratterizzando in tal modo il materiale con il solo rapporto di carico. Ponendo $m=0$, si ottengono le convenzionali interpolazioni in cui, per ogni specifico valore di R , occorre conoscere le relative costanti di propagazione (C, n, p, q) .

In Fig.4a sono riportate le interpolazioni dei dati sperimentali con il modello di Collipriest, mentre la Fig. 4b mostra gli stessi dati interpolati con l'equazione di Forman ($m=0$, costanti di propagazione calcolate per ciascun valore di R).

Si é quindi valutata la capacità del modello di Forman, con $m \neq 0$, ad interpolare le velocità di propagazione utilizzando un solo set di valori delle costanti di propagazione calcolati per un fissato valore di R .

La stima del valore del coefficiente di traslazione, m , viene effettuata secondo la procedura qui di seguito indicata:

- 1) assumere per p e q un valore minore dell'unità in modo che l'equazione interpoli bene nel tratto lineare (in questo caso $p=q=0.5$)
- 2) calcolare le costanti C ed n per un prefissato valore di R ($R=0.0$) con il metodo dei minimi quadrati.
- 3) considerare un valore di da/dN corrispondente alla metà del tratto lineare, sempre sulla curva relativa al prefissato valore di R ($R=0.0$)
- 4) stimare il valore ottimo del coefficiente di traslazione, m , al fine di ottenere delle soddisfacenti interpolazioni delle curve di propagazione relative a diversi valori del rapporto di carico.
- 5) verificare che l'introduzione del termine di traslazione con il coefficiente m così calcolato, permetta una corretta ed accurata rappresentazione delle curve di propagazione su tutto il campo di variazione di R .

In Fig. 5 sono riportate le interpolazioni delle velocità di propagazione sull'intero campo di variazione di R ,

utilizzando le costanti di propagazione calcolate per $R=0.0$ e con un coefficiente di traslazione stimato: $m=-1.51$. In Tab.3 sono riportati i valori delle costanti di propagazione per tre diversi modelli semiempirici e per le condizioni di carico assunte nel corso delle prove.

Tab.3 Valori delle costanti di propagazione per i modelli semiempirici.

	R	0.5	0.25	0.2	0.0	-0.3	-0.4
Paris	C	9.42	16.80	3.40	3.12	3.60	3.20
	n	3.27	2.59	3.17	3.01	2.77	2.73
Collip.	C	29.9	31.6	6.38	7.26	2.40	4.23
	n	2.38	2.23	2.82	2.72	3.02	2.79
Forman	C	16.1	41.3	8.78	12.4	15.5	20.4
	n	2.26	1.60	2.18	1.95	1.78	1.64
	p	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	q	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

4. Analisi Frattografica e Meccanismi di Frattura

Il materiale studiato presenta tre strutture tipiche: a) "beta", b) "alfa aciculare" e c) "alfa primaria". A seconda della direzione considerata, rispetto a quella di laminazione, le tre strutture possono coesistere tutte o solo alcune di esse.

In Fig.6 è riportata la metallografia della superficie normale alla direzione L, nella quale sono chiaramente visibili le strutture "beta" e "alfa aciculare". Per le superfici normali alla direzione T si osserva anche la presenza della struttura "alfa primaria" (Fig.7).

La contemporanea presenza delle due strutture alfa ha una diretta influenza sulle morfologie delle superfici di frattura, particolarmente nella zona d'innescio.

L'analisi frattografica al SEM, oltre che informazioni qualitative sui meccanismi di frattura, fornisce anche dati quantitativi concernenti la propagazione [6]. In questo lavoro, l'attenzione è stata focalizzata sull'individuazione dei meccanismi di frattura e sull'analisi delle caratteristiche morfologiche delle superfici di frattura. Lo studio è stato eseguito sulle superfici di frattura relative a tre diverse condizioni di prova, aventi rapporto di carico ed ampiezza del ciclo diversi.

In Fig. 8 sono riportate le frattografie delle superfici

di frattura relative a condizioni di carico caratterizzate da un elevato valore di R ed un basso valore dell'ampiezza di carico P ($R=0.5$, $P=3.0$ KN). Si osserva una frattura di tipo fragile con presenza di zone di clivaggio. Tali zone presentano anche delle regioni equiassiali circondate da creste lacerate che contengono delle profonde depressioni. Secondo alcuni autori, tali morfologie possono essere associabili, nel caso di bassi valori di ΔK , alla contemporanea presenza delle due strutture alfa primaria ed aciculare.

Superata la zona d'inesco, si osserva un cambiamento del meccanismo di frattura. In particolare le superfici mostrano una frattura sempre di tipo fragile, ma con presenza di numerose cricche secondarie di tipo trasversale, Fig.9. Per valori più elevati di ΔK , si riscontra una ulteriore variazione del meccanismo di frattura, che diventa di tipo duttile, con presenza di striature di fatica, Fig.10.

All'aumentare dell'ampiezza di carico ($R=0.0$, $P=6.0$ KN), le superfici di frattura presentano caratteristiche morfologiche simili ma a distanze diverse dall'inesco. In particolare, si osserva un'anticipazione dei meccanismi di frattura che si manifestano a distanze minori dalla zona d'inesco. Se l'ampiezza del ciclo di carico è sufficientemente elevata alcuni di essi, quali per esempio il clivaggio o la formazione di cricche secondarie, possono scomparire del tutto. In tali circostanze, si ha un solo meccanismo di frattura sin dalla fase d'inesco, che risulta di tipo duttile con nitide striature di fatica che risultano chiaramente leggibili in quanto l'entità dell'avanzamento per ciclo è maggiore e più deciso.

5) CONCLUSIONI

L'utilizzazione dei modelli semiempirici, pur essendo vincolati alla determinazione sperimentale delle costanti che vi compaiono, da la possibilità, a livello macroscopico, di interpretare in modo soddisfacente i fenomeni di propagazione delle cricche.

In particolare, nel presente lavoro, si è verificato che con il modello di Forman, stimando opportunamente la costante m, il termine $(1-R)^m$, permette di traslare l'andamento delle curve da/dN al variare del solo rapporto di carico: ciò comporta l'esecuzione di un minor numero di prove sperimentali.

Nella lega di Titanio analizzata si è visto che i meccanismi di frattura dipendono essenzialmente dall'entità del carico applicato e da R. Si è notato che le tre fasi clivaggio, formazioni di cricche secondarie e striature di fatica vengono anticipate aumentando il valore del carico. Questo conferma che la propagazione della cricca dipende sia dalla orientazione che dai trattamenti termici: una opportuna ottimizzazione di questi due effetti potrebbe portare ad avere una lega con maggiore tenacità.

6) BIBLIOGRAFIA

- [1] Atluri S.N.- Computational Methods in the mechanics of fracture -Vol2 Elsevier Science Publishers B.V.- New York -1986
- [2] Cavallini M, Felli F., Marchetti M.- Fatigue crack propagation in Al and Al-Li Alloys. Aerotecnica Missili e Spazio Vol.66, n.3,pp.25-34,1987.
- [3] Felloni L., Fratesi R., La Barbera A., Marchetti M. - Experimental and numerical analysis on fatigue crack propagation on three medium-strength steels. Aerotecnica Missili e Spazio, Vol.64,n.4 pp.215-220,1985.
- [4] Ginatta Torno Titanium - II Meeting sul Titanio RT 87/10-060, 1986
- [5] Wanhill R.J.H. - Titanium alloys for aerospace - NLR TR 71003U, May 1971
- [6] Karlsson B., Wasén J. - The use of quantitative fractography in Fatigue crack growth studies. Failure Analysis-Theory and Practice, E.Czobololy Ed. Proceed. ECF7, Budapest 1988
- (7) Paris P.C., Erdogan F. - A critical analysis of crack propagation laws- Trans. ASME, J. Basic Eng.,Vol.85, N.4,pp.528- ,1963

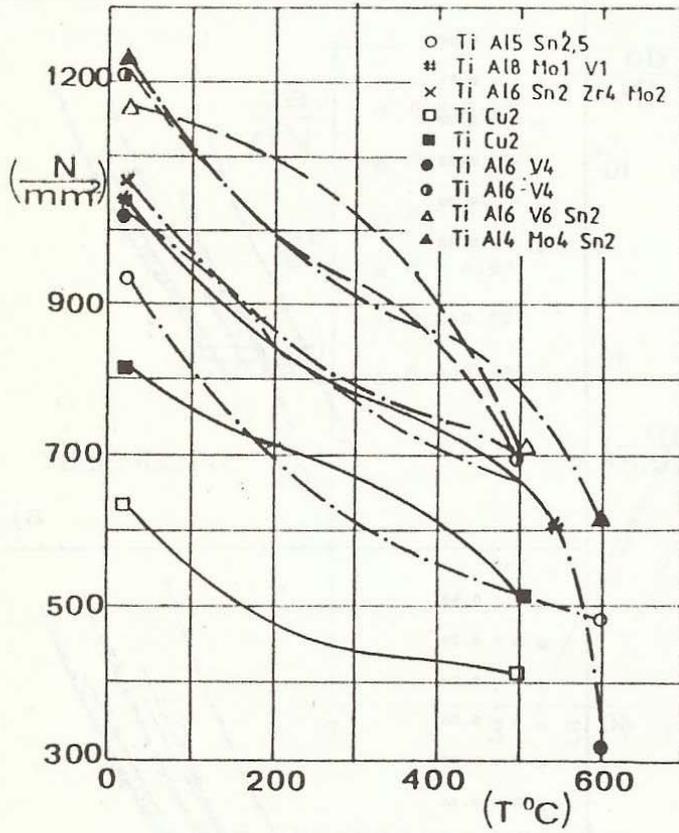


FIG. 1

Influenza della temperatura sulla resistenza di alcune leghe di Titanio(4)

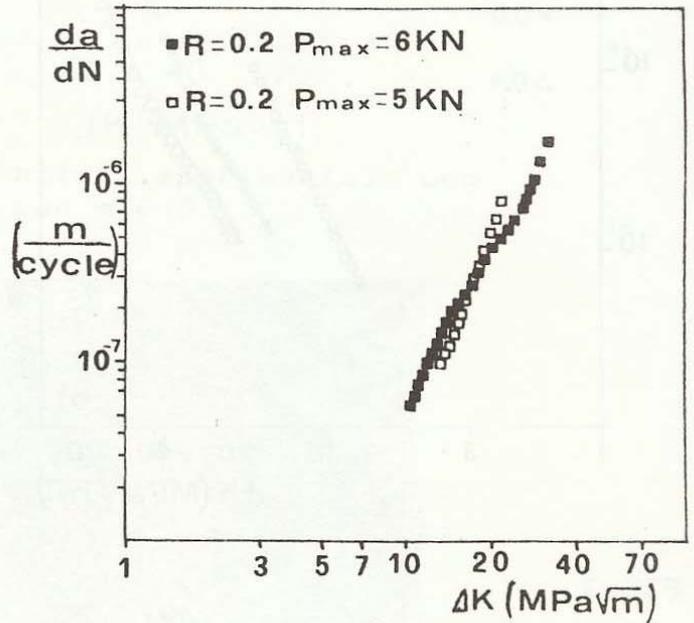
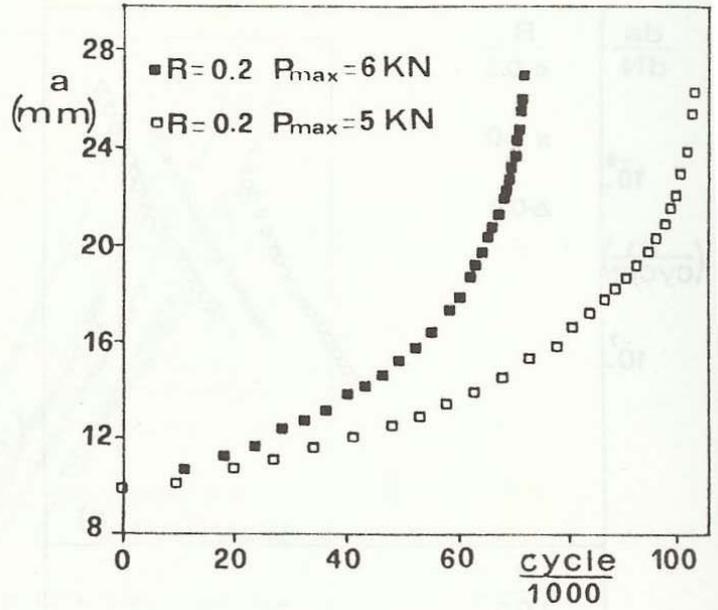


FIG. 2

Effetto del carico massimo sulla propagazione di cricche per fatica ($R=\text{cost.}$)

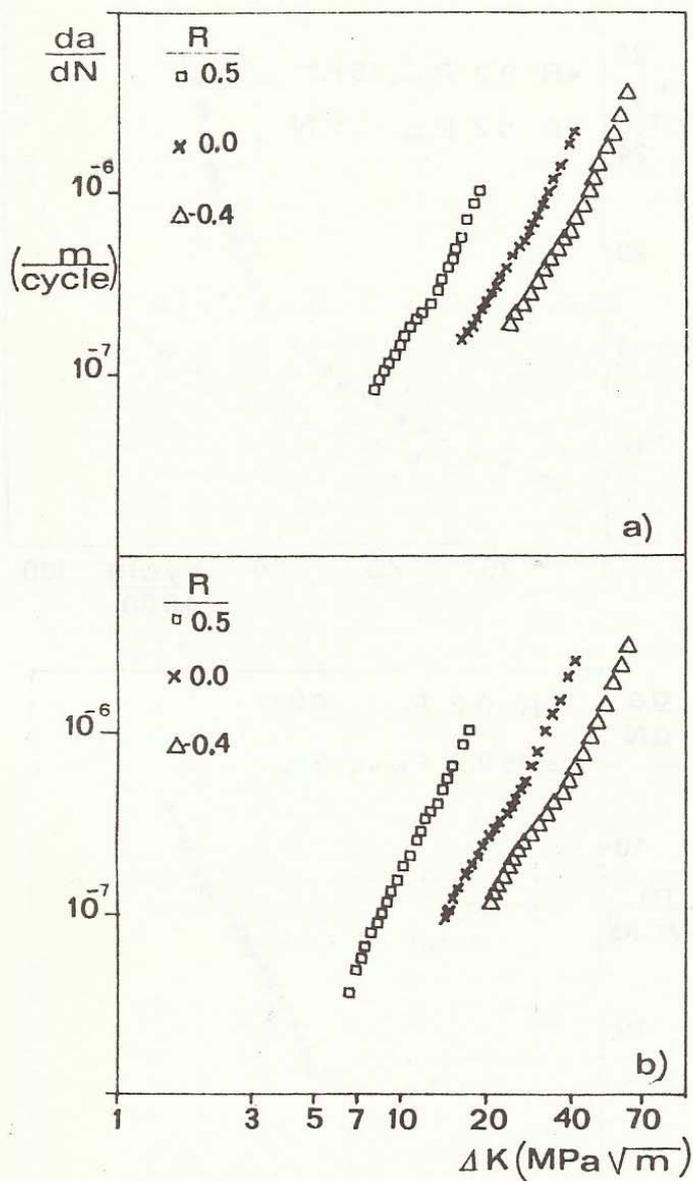


FIG. 3

Effetto del rapporto di carico sulla velocità di propagazione:

a) $P_{max}=6$ KN

b) $P_{max}=5$ KN

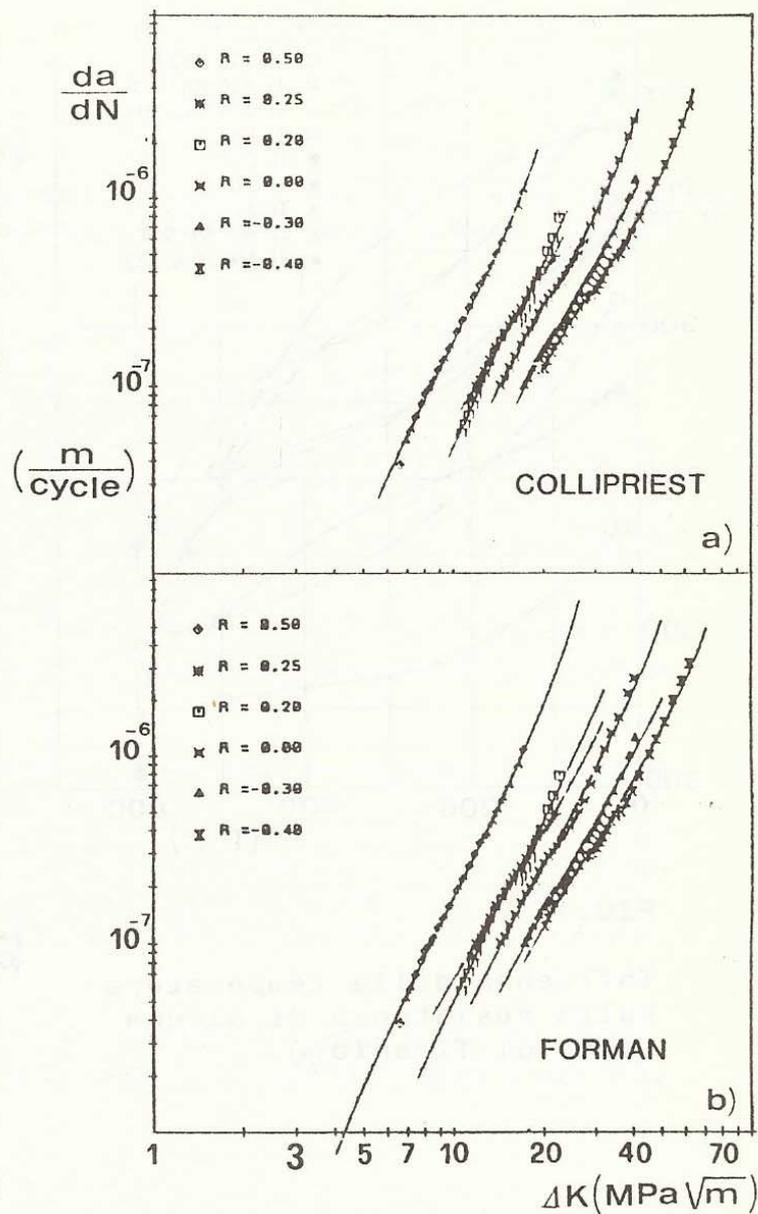


FIG. 4

Interpolazione dei risultati sperimentali con i modelli semiempirici:

a) equazione di Collipriest

b) " di Forman ($m=0$)

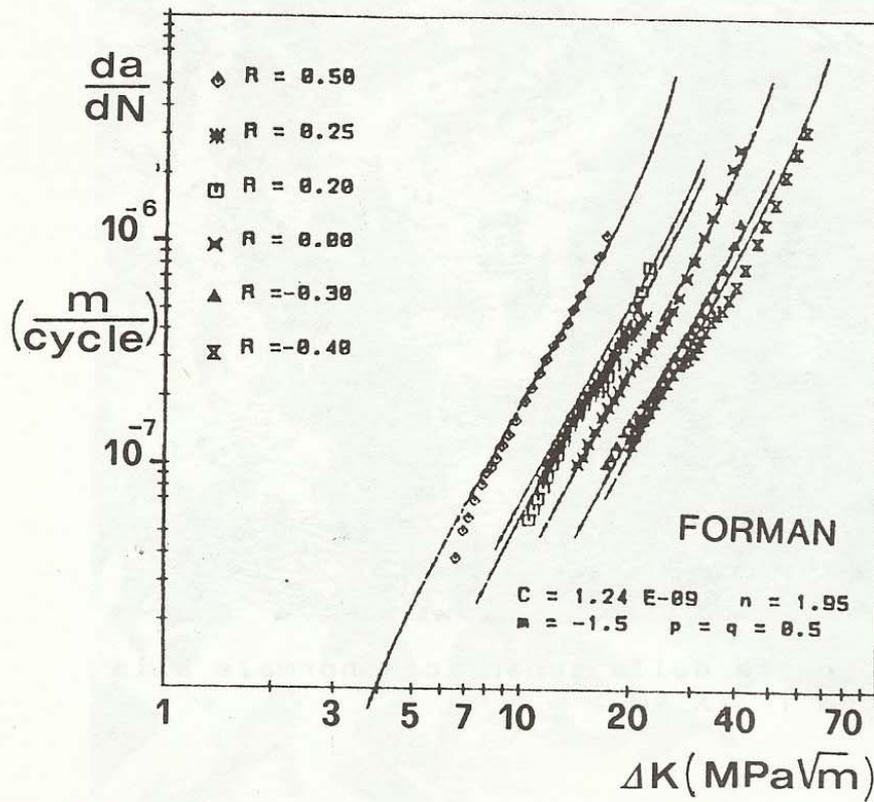


FIG.5 Interpolazione dei risultati sperimentali con l'equazione di Forman con $m \neq 0$.

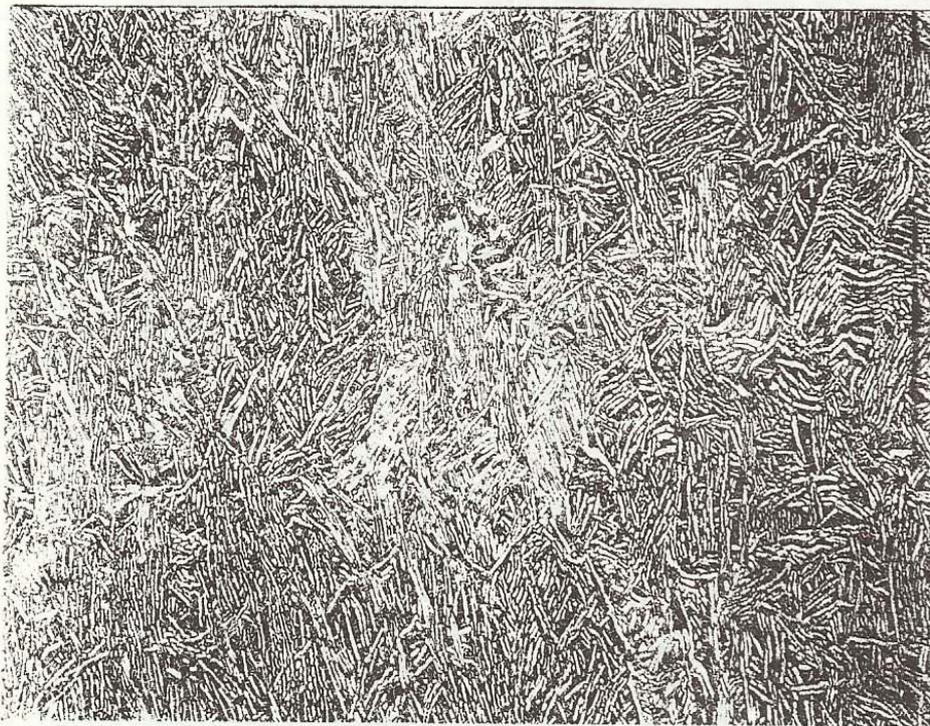


FIG.6 Metallografia della superficie normale alla direzione L (X 100)

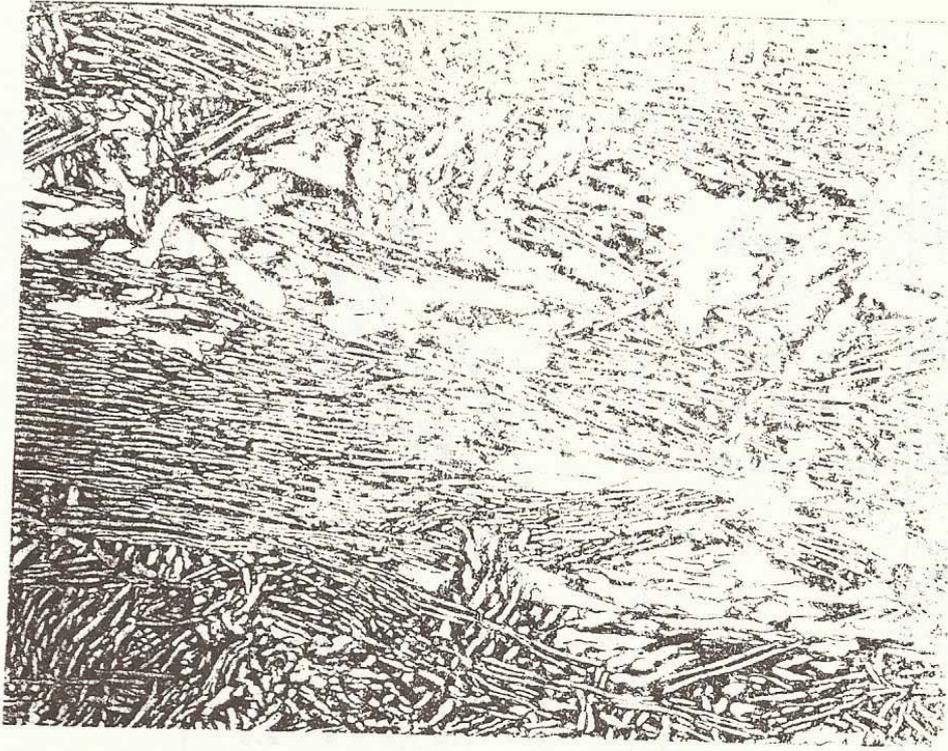


FIG.7 Metallografia della superficie normale alla direzione T (X 100)

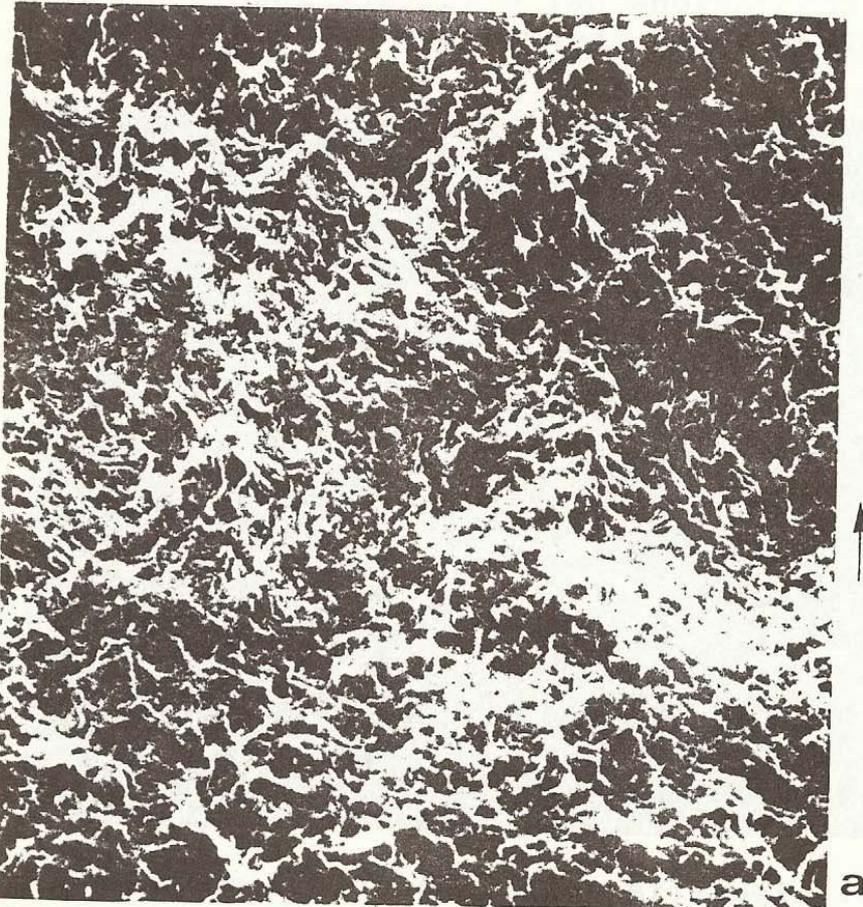


FIG. 8

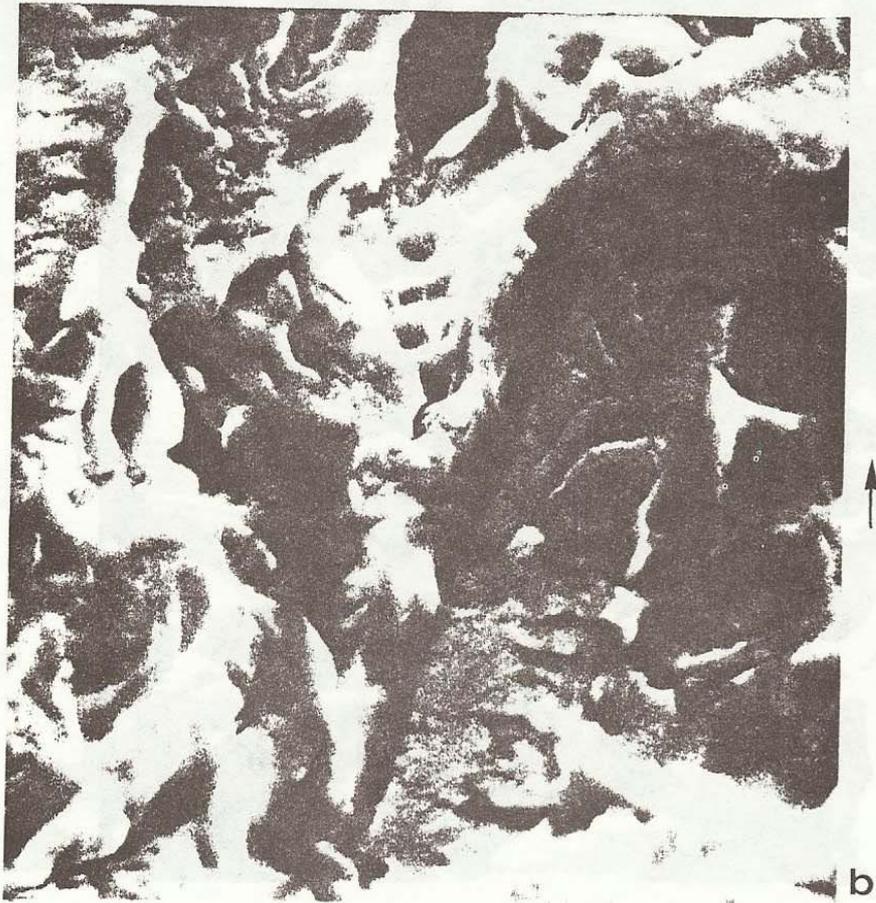


FIG.8 Frattografie della superficie di frattura nella zona di innesco: a) x300; b) x3000

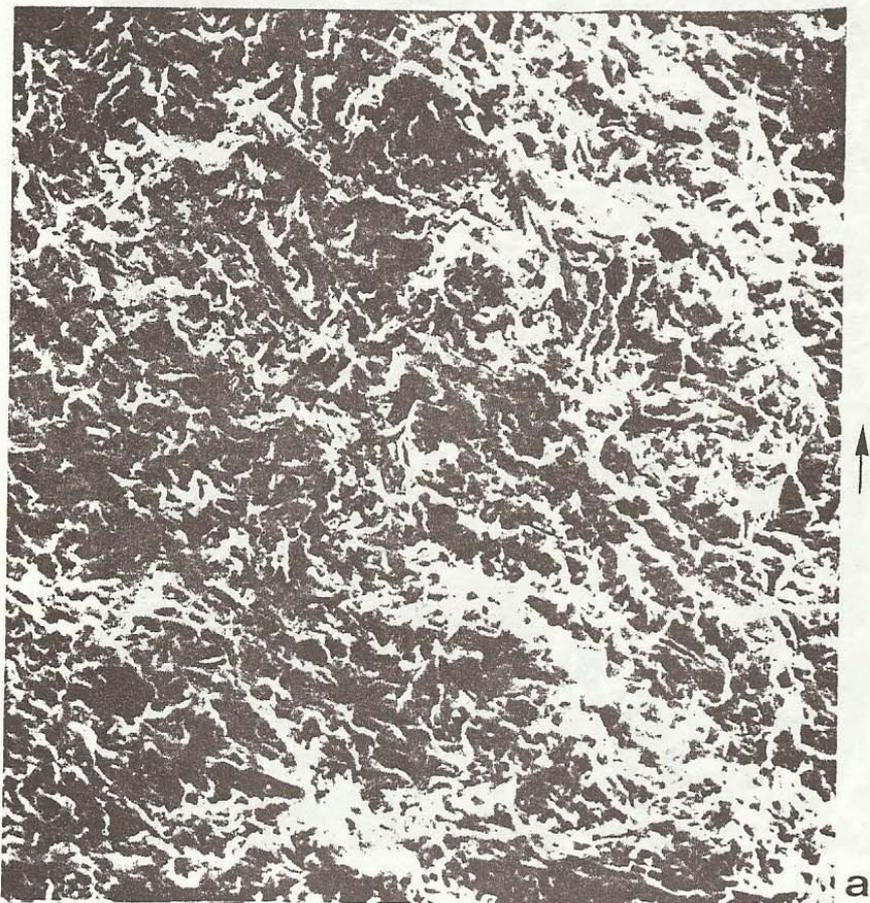


FIG.9

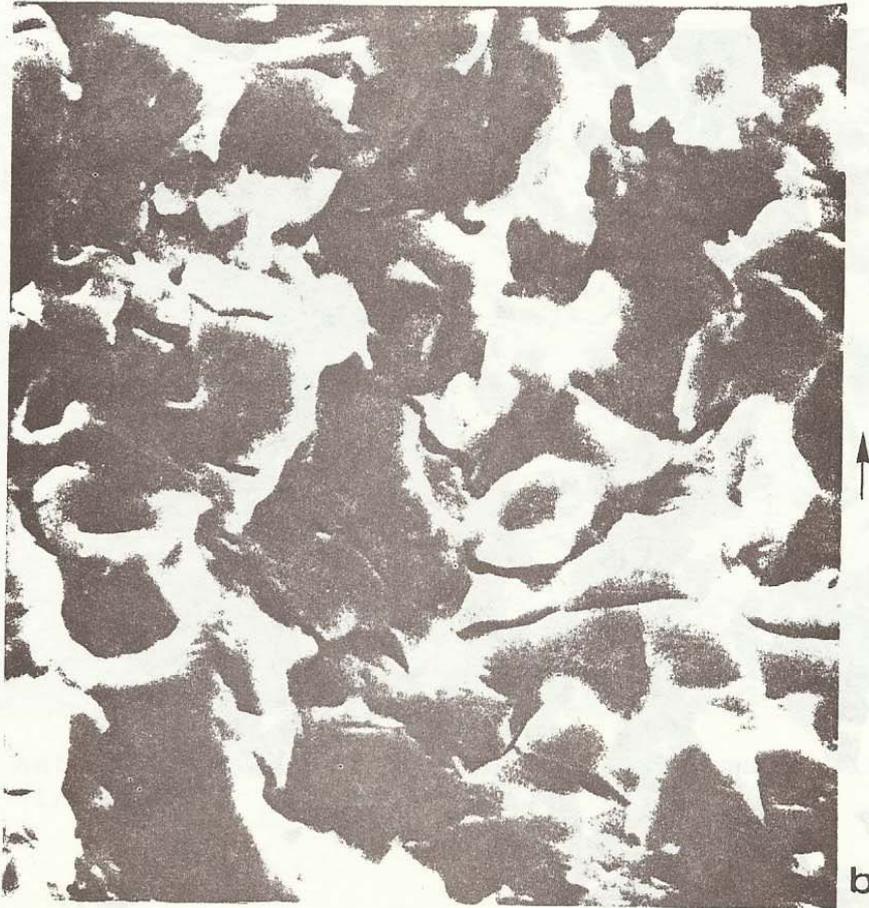


FIG.9 Frattografie delle superfici di frattura a 8mm dalla zona di innesco: a) x300; b) x3000

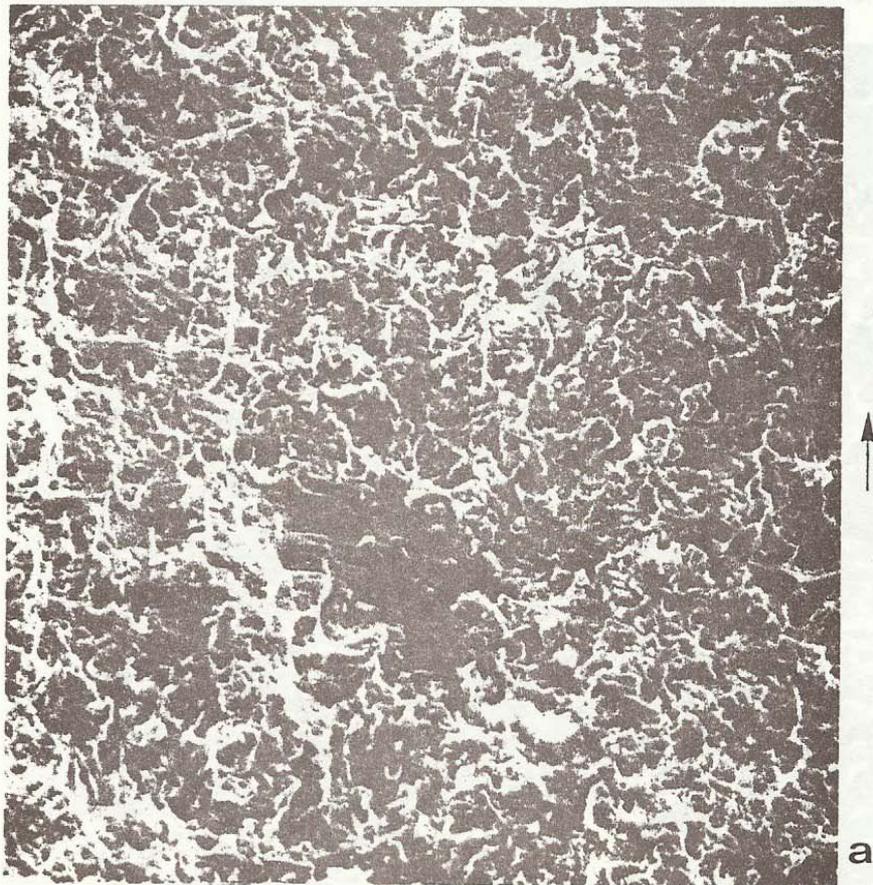


FIG. 10



FIG.10 Frattografie della superficie di frattura nella zona di propagazione instabile: a) x300; b)x3000