

STUDIO DEGLI EFFETTI AMBIENTALI SULLA PROPAGAZIONE DI UNA CRICCA
PER FATICA: MODELLI SEMIEMPIRICI E VERIFICA SPERIMENTALE.

M.Marchetti (*), L.Felloni (**), O.Ruggeri (***)
M.Tortorici (*), A.la Barbera (*)

* Dipartimento Aerospaziale - Università di Roma
** Dipartimento Scienza dei Materiali - Università di Ancona
*** Istituto di Metallurgia - Università di Bologna

Riassunto

In questo lavoro vengono presentati i risultati di uno studio numerico-sperimentale sulla propagazione di cricche per fatica in diversi ambienti.

Le prove sperimentali sono state eseguite, in conformità alla normativa ASTM E647-81, con tre acciai a medio limite di snervamento in aria di laboratorio e soluzione NaCl al 3.5%.

I risultati delle prove in soluzione salina, effettuate in soluzione aerata, deaerata e deaerata con provino polarizzato catodicamente, sono dettagliatamente analizzati.

Dall'esame delle curve $da/dN=F(\Delta K)$ e delle frattografie SEM si è cercato di interpretare i fenomeni che hanno accompagnato il processo di frattura.

Dallo studio sui modelli semiempirici, che attualmente vengono considerati come i più validi, sono emerse interessanti caratteristiche peculiari di ciascuno di essi in relazione al tipo di sistema materiale-ambiente considerato.

Introduzione

Lo sviluppo della meccanica della frattura come mezzo tecnicamente e scientificamente valido per la previsione del comportamento di strutture criccate ha reso necessario la conoscenza di dati riguardanti la propagazione per fatica di cricche nei diversi materiali (caratterizzazione a frattura dei materiali) e lo sviluppo di teorie e modelli in grado di simulare i fenomeni di propagazione.

In un fenomeno di rottura per fatica si possono individuare diverse fasi tra loro correlate:

- 1) Danneggiamento ciclico iniziale
- 2) Formazione di cricche microscopiche iniziali
- 3) Coalescenza di queste microcricche fino a formare una (macro-) cricca iniziale
- 4) Propagazione macroscopica della cricca
- 5) Rottura finale catastrofica o instabilità

Da un punto di vista ingegneristico, i primi tre stadi vengono generalmente conglobati nel processo singolo di innesco della (macro-) cricca che si può considerare come quel difetto

con dimensioni tali da essere rilevabile con gli attuali metodi d'ispezione.

Il presente lavoro intende portare un contributo di studio relativamente allo stadio 4 tra quelli suddetti.

I maggiori problemi connessi ad un tale tipo di studio sono essenzialmente legati alla complessità del fenomeno di propagazione che è governato da molti parametri di carattere meccanico, metallurgico e chimico.

Per questo si cerca di semplificare la trattazione considerando solo un numero limitato di variabili con la conseguente definizione di modelli non completamente generali.

Su questa fase si ravvisa la necessità che studi teorici-sperimentali siano condotti con notevole spirito critico e che siano effettuate verifiche ed analisi comparate tra i dati sperimentali, numerici e frattografici.

In questo studio si è cercato d'interpretare i fenomeni di propagazione cercando di associare dei possibili meccanismi di frattura ai diversi andamenti delle curve $da/dN=F(\Delta K)$.

In tal modo è stato possibile valutare la validità e la generalità dei modelli adottati e la correttezza delle prove sperimentali.

Materiali e Metodologia Sperimentale

I materiali esaminati nel presente lavoro sono tre acciai a medio limite di snervamento di cui in Tab. 1 e 2 sono riportate la composizione chimica e le proprietà meccaniche.

Questi acciai, commercialmente prodotti come piastre laminate a caldo e normalizzate, sono induriti con un processo di precipitazione.

I provini CT ($W=2.5E-2$ m, $B=5.0E-3$ m) utilizzati nelle prove sono stati tagliati secondo l'orientazione T-L.

Gli ambienti nei quali sono state effettuate le prove sono: aria di laboratorio e soluzione di NaCl 3.5% aerata e deaerata per gorgogliamento continuo di azoto VPP.

In quest'ultima soluzione sono state condotte prove senza e con polarizzazione catodica (-1.125 V (ECS)) del provino.

La lunghezza della cricca è stata misurata per mezzo di due microscopi ottici disposti in prossimità dell'apice della cricca sulle due facce del provino sulle quali erano state effettuate delle impronte di microdurezza a distanze prestabilite lungo la direzione di propagazione. Nei successivi calcoli è stato considerato il valor medio delle misurazioni così effettuate.

Tutte le prove sono state condotte a temperatura ambiente ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) con i seguenti valori delle variabili meccaniche:

$$R = 0.17$$

$$P_{\max} = 2.75 \text{ KN}$$

ciclo di carico: onda sinusoidale

$f = 4 \text{ Hz}$ in aria di laboratorio

$f = 2.4 \text{ Hz}$ in soluzione salina

ACCIAIO	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Nb	Al
Fe 420KT	0.18	1.31	0.31	0.010	0.007	0.12	0.27	0.08	0.02	0.01	0.07	0.04	0.05
A710-A	0.05	1.36	0.30	0.003	0.006	1.20	0.92	0.65	0.02	0.02	0.07	0.03	0.01
NICUAGE/R	0.04	0.83	0.28	0.010	0.007	1.02	0.88	0.07	-	0.19	-	0.06	0.04

Tab. 1 - Composizione chimica e struttura degli acciai studiati.

ACCIAIO	σ_y (MPa)	σ_R (MPa)	A (%)
FeE420-KT	430	580	30
A710-KT	730	880	20
NICUAGE/R	490	605	28

Tab. 2 - Proprietà meccaniche degli acciai studiati.

Modelli Semiempirici di Propagazione di una Cricca per Fatica

I modelli semiempirici costituiscono il tentativo di esprimere analiticamente il fenomeno di propagazione di un difetto attraverso l'impiego di uno o più parametri che le analisi teoriche ed i risultati sperimentali hanno indicato

come significativi nel rappresentare il fenomeno unitamente ad alcune costanti caratteristiche di cui si cerca di individuare lo specifico significato fisico.

Tali modelli non sono delle "leggi" ma solo delle rappresentazioni matematiche del comportamento di propagazione delle cricche al fine di poterle integrare.

Paris è stato tra i primi a proporre un modello semiempirico. Il maggior merito della relazione esprime tale modello è stato quello di individuare come parametro fondamentale che governa il fenomeno di propagazione, il ΔK .

Tale equazione è valida solo per valori di ΔK sufficientemente lontani da quello di soglia, ΔK_0 , e quello critico, K_C che, come noto esprime la tenacità a frattura di un materiale.

Un'equazione più generale è stata proposta da Forman che introduce come altri parametri il rapporto di carico, R , e K .

Le formule che consentono di rappresentare l'intero fenomeno, considerando anche le zone di soglia e quelle critiche, sono quelle di Forman modificata e di Collipriest.

Mentre la prima ricalca, nella sua struttura, la formula di Paris, l'equazione di Collipriest parte da un'analisi degli andamenti sperimentali $da/dN = F(\Delta K)$ in diagrammi logaritmici.

Con opportune manipolazioni algebriche di funzioni elementari che presentano analoghi andamenti, Collipriest giunge ad una formula che è governata dalla funzione arcotangente iperbolica.

Riportiamo qui di seguito le due formule suddette che sono state utilizzate nelle analisi dei dati sperimentali e che sono state inserite in un programma di calcolo generale per l'analisi e la simulazione dei fenomeni di propagazione.

Equazione di Forman Modificata:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^n [\Delta K - \Delta K_0]^p}{[(1-R)K_C - \Delta K]^q} \quad (1)$$

dove:

$$\Delta K_0 = (1 - AR)K_0$$

Equazione Di Collipriest:

$$\frac{da}{dN} = C_0 (K_C \Delta K_0)^{n/2} \exp \left\{ \ln \left[\frac{K_C}{\Delta K_0} \right]^{n/2} \operatorname{arctgh} \left[\frac{\ln(\Delta K^2 / [(1-R)K_C \Delta K_0])}{\ln[(1-R)K_C / \Delta K_0]} \right] \right\} \quad (2)$$

Risultati Sperimentali

La velocità di propagazione della cricca, ottenuta partendo dalle misure della lunghezza della cricca utilizzando il metodo del polinomio incrementale a 7 punti, è stata riportata, per le diverse prove effettuate, in diagramma doppio logaritmico in funzione dell'ampiezza del fattore d'intensità degli sforzi.

Nella Fig.1 i valori sperimentali di da/dN rispetto a ΔK mostrano il comportamento dei tre acciai in aria di laboratorio e in soluzione aerata di NaCl al 3.5%.

L'effetto ambientale è quasi irrilevante ad alti valori di ΔK mentre a bassi valori di ΔK è più evidente pur restando relativamente scarso.

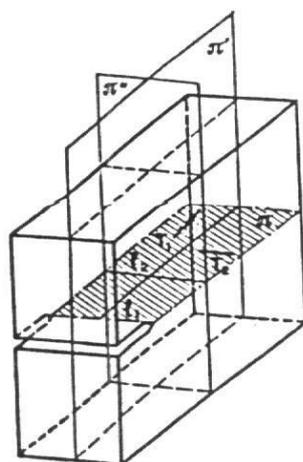
È il caso qui di rilevare che un processo di corrosione può determinare un rallentamento della propagazione di una cricca in dipendenza dalle caratteristiche cinetiche delle reazioni catodiche ed anodiche e dal tipo di prodotti di corrosione.

Questo rallentamento può avvenire in particolare quando o i prodotti di corrosione formati all'apice della cricca sono solidi e tali da essere di impedimento alla chiusura della cricca durante la fase di diminuzione del carico per ogni ciclo, oppure quando alla superficie di frattura vicino all'apice si hanno reazioni anodiche e catodiche tali da portare ad un arrotondamento dell'apice stesso. Questo fatto, come è noto, porta ad una diminuzione del valore effettivo di ΔK e quindi ad una minore velocità di propagazione a parità di sollecitazione meccanica applicata.

L'effetto dell'ambiente corrosivo è invece favorevole ad un accelerato avanzamento della cricca quando si abbia una diffusione per processi di tipo anodico degli atomi emergenti.

Nel caso del NICUAGE/R, di struttura fondamentalmente ferritica, la minore velocità d'avanzamento della cricca in ambiente clorurato può essere interpretata in termini di un lieve arrotondamento della cricca a bassi valori di ΔK , quando cioè i processi corrosivi hanno più tempo per svilupparsi (Fig. 1).

La superficie di frattura di provini sollecitati in soluzione salina, osservata al SEM, era caratterizzata da un distacco di tipo prevalentemente fragile e da cricche secondarie intergranulari trasversali, in modo quasi analogo a quelle osservate in provini sollecitati in aria ma, come visibile confrontando le frattografie in figura 2, anche da un notevole smussamento delle superfici stesse.



Schema di cricche longitudinali (T1) e trasversali (T2).

Ai piu' alti valori di ΔK si e' notato un'accentuazione in numero e dimensione delle cricche secondarie trasversali e longitudinali i cui piani di giacitura sono illustrati in figura.

Per gli acciai A710-A e FeE420-KT la maggior velocita' di propagazione della cricca in ambiente aggressivo va ascritta ad alta reattivita' preferenziale degli atomi emergenti con conseguente abbassamento del ΔK .

In effetti nelle superfici di frattura derivanti da prove in soluzione salina non erano visibili le striature duttili da fatica osservabili invece fino ad una lunghezza della cricca corrispondente a valori di ΔK pari a circa $21 \div 28 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ nei provini sollecitati in aria di laboratorio (vedi Fig.3).

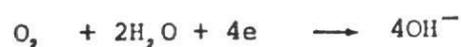
Inoltre per l'acciaio FeE420-KT, come illustrato dalla Fig.4, nell'intorno di $\Delta K = 23 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, le curve da/dN vs ΔK in ambiente aggressivo aerato hanno sempre presentato un netto aumento rispetto a quelle in aria.

Cio' puo' essere imputato ad un maggior contributo, all'avanzamento della cricca, del processo corrosivo interessante le cricche secondarie longitudinali che compaiono numerose anche in aria a valori di ΔK maggiori di $21 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ (Fig.3).

In soluzioni clorurate deaerate il processo corrosivo, che in tutti i casi e' sotto controllo catodico, deve ritenersi minore per l'assenza della reazione di riduzione dell'ossigeno. Nella Fig.5 e' mostrato come questo effetto sia ben evidente per l'acciaio FeE420-KT.

Con polarizzazione catodica a -1.125 V (ECS), un acciaio e', come noto, sottoposto a protezione catodica, cioe' immune dalla corrosione in NaCl.

Sebbene ci possa essere una qualche riserva sull'effettivo controllo del potenziale elettrodico in prossimita' dell'apice della cricca, nelle suddette condizioni di polarizzazione le reazioni elettrochimiche all'apice della cricca sono del tipo sotto riportato.



Processi Catodici

E' una questione tuttora molto discussa quanto l'infragilimento da idrogeno di un materiale ferroso sia dovuto ad accumulo di idrogeno assorbito all'interno del materiale stesso o ad una variazione di energia superficiale e ad una diminuzione delle forze coesive fra gli atomi nell'intorno dell'apice della cricca.

Ovviamente una distinzione tra i processi operanti puo' essere fatta in base al tempo di risposta di ogni sistema alle condizioni ad esso imposte, giacche' ogni processo avviene in un tempo definito.

Come si vede dalla Fig.6 l'influenza della polarizzazione catodica sulla velocita' di propagazione di una cricca e' ben evidente a bassi valori di ΔK .

L'aumento della velocita' di propagazione nei primi stadi di avanzamento della cricca riscontrato in tutti e tre gli acciai che sono stati qui considerati puo' essere interpretato come effetto di adsorbimento dell'idrogeno e di decoesione da esso provocato, dando supporto alla teoria di Troiano-Oriani.

Infatti c'e' da ritenere che il valore del ΔK_0 sia decisamente diminuito sotto queste condizioni anche con piccole concentrazioni di idrogeno nel metallo.

Le osservazioni al SEM hanno indicato che le superfici di frattura sono caratterizzate da numerose aree di quasi clivaggio gia' a bassi valori di ΔK come e' mostrato dalla micrografia in Fig.7.

Come era prevedibile, l'influenza della frequenza del ciclo di carico e' rilevante in ambiente aggressivo. Poiche' le superfici di frattura nelle prove a 0.1 Hz hanno mostrato la presenza di ossidi, e' da ritenere che l'aumento della velocita' di propagazione della cricca (vedi Fig.8) sia dovuta alla possibilita' di formazione di prodotti di corrosione solidi senza arrotondamento dell'apice della cricca stessa.

Studio dei Modelli Semiempirici

Le formule descrittive dei modelli semiempirici di Forman e di Collipriest presuppongono, per le loro applicazioni, la conoscenza di ΔK_0 e K_c che ovviamente sono caratteristici di ogni materiale in un dato ambiente e, per ΔK_0 , con un dato rapporto di carico R.

Nella maggior parte dei casi, questi due valori non sono deducibili dalle curve sperimentali da/dN vs ΔK come si e' verificato nel presente studio per i tre acciai esaminati.

Per essi tuttavia, dall'andamento delle curve sperimentali e da valori riportati in letteratura per acciai simili, puo' essere presupposto che valori attendibili per ΔK_0 e per K_c siano compresi fra 3 e 13 $MPa\sqrt{m}$ e 70-150 $MPa\sqrt{m}$ rispettivamente.

Inserendo di volta in volta una coppia di valori scelta, tramite un programma numerico basato sul metodo dei minimi quadrati, si possono calcolare le costanti che figurano nella formulazione modificata di Forman o in quella di Collipriest.

Nella Tab.3 sono riportati i risultati di un tale calcolo usando i risultati sperimentali della prova descritta in Fig.1 riferentesi al A710-A in NaCl 3.5% aerato.

Nell'applicazione dell'equazione modificata di Forman sono state effettuate due elaborazioni: nel primo caso sono stati ricavati i valori di tutte e quattro le costanti dai valori sperimentali per le diverse coppie di ΔK_0 e K_c , nel secondo

caso si sono posti valori fissati di "p" e "q" pari ad 1.

In Fig. 9, 10 e 11 sono riportati i risultati ottenuti integrando numericamente le equazioni di Paris, Collipriest e quella modificata di Forman. Da notare (Fig. 9) che con l'equazione di Collipriest si hanno i risultati migliori prendendo per ΔK_0 dei valori non superiori a $7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ mentre in uno studio analogo condotto sullo stesso acciaio in aria di laboratorio i risultati migliori si sono ottenuti con $\Delta K_0 = 11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (vedi [1]).

I risultati forniti integrando l'equazione di Forman appaiono invece praticamente indipendenti da ΔK_0 e K_L .

In Tab.4 e' riportato il numero cicli necessario per raggiungere una lunghezza, a, della cricca pari a 0.017m ottenuto sperimentalmente ed integrando le equazioni suddette.

In Fig.12 e' riportata la curva ottenuta simulando una prova eseguita con provino CD62V e ambiente salino aerato che mostra un andamento irregolare caratterizzato da un salto per $\Delta K=23$.

Da notare che un tentativo di ottenere da questa prova tutte e quattro le costanti di Forman ha fornito valori per "c" tanto bassi da impedire una integrazione numerica con risultati per da/dN diversi da zero (vedi Fig.13).

In Fig.14 sono riportati invece i comportamenti per R variabile dei modelli di Collipriest e Forman; le costanti sono state ottenute sfruttando i risultati di una prova sperimentale eseguita con $R=0.17$.

Si e' preso per valore probabile di ΔK_0 , per tale R, $\Delta K_0=11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ e si e' dato per valori diversi di R un ΔK_0 ottenuto dalla formula $\Delta K_0(R) = (1-AR)\Delta K_0(0)$ con A posto arbitrariamente uguale ad 1 dato che questa scelta assicura, secondo raccomandazioni ESA, risultati conservativi.

Si noti che le due equazioni danno risultati piu' divergenti all'aumentare di R.

In Tab.5 sono riportati i cicli necessari a superare $K_L(1-R)$ ottenuti integrando le equazioni suddette.

In base a quanto sopra riportato abbiamo potuto trarre alcune considerazioni sui modelli studiati.

Si puo' dire che in genere le prove sperimentali hanno dato risultati qualitativamente non troppo dissimili sia in aria di laboratorio che in soluzione clorurata. Questo fatto puo' essere attribuito alla mancata insorgenza, almeno in modo evidente, di tensocorrosione, o SCC, nelle prove in NaCl al 3.5%.

In seguito a cio' i modelli semiempirici considerati, che sono stati studiati per descrivere il comportamento a frattura per fatica dei materiali in assenza di processi corrosivi evidenti, hanno dato risultati quasi sempre accettabili anche per ambienti clorurati.

Anche il modello di Paris, pur nella sua estrema semplicita', appare tuttora utile per avere un'immediata valutazione del comportamento globale a frattura per fatica di un materiale in un dato ambiente.

L'equazione di Collipriest ha fornito ottimi risultati per tutte le prove considerate e, nell'ipotesi che sia valida in prima approssimazione la distribuzione sigmoidale dei valori di da/dN vs ΔK , anche per valori di ΔK per cui manchino dati

			Equazione di Forman modificata				Eq. di Collipriest	
	ΔK_0 (MPa \sqrt{m})	K_C (MPa \sqrt{m})	C (m/ciclo)	n	p	q	C (m/ciclo)	n
1	3	150	0.5147 E-20	15.110	-9.973	-2.958	0.3637 E-10	2.623
2	5	150	0.3870 E-19	9.529	-4.641	-2.745	0.3164 E-10	2.684
3	7	150	0.3222 E-18	7.711	-2.475	-2.509	0.3753 E-10	2.651
4	7	70	0.3549 E-12	5.306	-1.536	-0.207	0.2160 E-9	2.062
5	7	120	0.4409 E-16	6.874	-2.355	-1.632	0.4013 E-10	2.619
6	11	150	0.4144 E-16	4.821	-0.723	-1.916	0.11172 E-9	2.356
7	13	150	—	—	—	—	0.3471 E-9	2.062
8	5	150	0.1262 E-7	1.401	1	1	—	—
9	11	150	0.1121 E-6	0.860	1	1	—	—
10	EQUAZIONE DI PARIS:						1.7496 E-11	2.9486

TAB. 3 – Valori delle costanti ottenute per i vari modelli studiati al variare di ΔK_0 e K_C (Acciaio A 710–A in NaCl 3.5% aerato).

		CICLI
Soluzione in NaCl 3.5% aerato	Risultati sperimentali	81000
	Collipriest ($\Delta K_0 = 3$)	71700
	Collipriest ($\Delta K_0 = 7$)	68500
	Collipriest ($\Delta K_0 = 13$)	100500
	Forman modif. ($\Delta K_0 = 5$)	71500
	Forman modif. ($\Delta K_0 = 11$)	71000
	Forman modif. ($p = 1, q = 1, \Delta K_0 = 5$)	73500
	Forman modif. ($p = 1, q = 1, \Delta K_0 = 11$)	80200
	Paris	73700
Aria di laboratorio	Risultati sperimentali	121000
	Collipriest ($\Delta K_0 = 11$)	117300

TAB. 4 – Numero dei cicli necessari per raggiungere una lunghezza di cricca prefissata ($a = 0.017$ m), ottenuto sperimentalmente e numericamente con $K_{IC} = 150$ MPa \sqrt{m} (Acciaio A 710–A)

	ΔK_0	CICLI
Risultati sperimentali ($R = 0.131$)	11	122000
Collipriest $R = 0.4$	8	56200
Forman modificata $R = 0.4$	8	36900
Collipriest $R = 0.7$	4	11000
Forman modificata $R = 0.7$	4	7600

TAB. 5 – Cicli necessari per avere K_{max} maggiore di $K_C = 150$ ottenuti numericamente per R variabile (Acciaio A 710–A)

sperimentali, sembra permettere un calcolo approssimato di ΔK_0 . Non è stata possibile un'analoga valutazione del K_c perché i risultati sperimentali non si estendevano per valori di ΔK sufficientemente elevati.

L'equazione modificata di Forman, che è quella pubblicata più di recente delle tre studiate, sembra richiedere un notevole impegno per giungere ad un calcolo adeguato delle 4 costanti.

In generale i valori ottenuti per queste quattro costanti non permettono alcuna valutazione qualitativa del comportamento di un materiale e a volte non permettono nemmeno un'integrazione numerica dell'equazione stessa.

Questi problemi sono parzialmente superati se si procede al calcolo solo di 2 costanti (c e n) ricorrendo per le altre 2 (p e q) ad una valutazione di tipo qualitativo che si basi sul grado di simmetria della curva da/dn vs ΔK . Una simile valutazione appare però difficilmente automatizzabile.

Il comportamento dei modelli di Collipriest e Forman è sensibilmente differente quando si prova ad ottenere previsioni per valori di R diversi da quello usato nelle prove sperimentali.

Studi condotti dall'ESTEC (Agenzia Spaziale Europea) sembrano mostrare in questo caso una maggiore attendibilità della equazione di Collipriest (vedi Fig. 15).

Occorre infine puntualizzare che la maggiore limitazione di tutte le equazioni studiate è la mancata considerazione dello effetto della frequenza. Tale effetto può diventare, come sopra evidenziato, molto sensibile in ambiente aggressivo.

Per applicazioni ingegneristiche, dove è sempre preferibile avere una valutazione conservativa del comportamento di un materiale, può essere consigliabile effettuare il calcolo delle costanti delle equazioni in soluzione aggressiva e a basse frequenze.

Conclusioni

Dallo studio condotto sui tre acciai considerati è stato possibile evidenziare i seguenti punti :

- Per tutte le tre leghe il comportamento nelle soluzioni clorurate non ha mostrato grosse differenze qualitative rispetto a quello in aria di laboratorio tranne che per un abbassamento del ΔK_0 riscontrato soprattutto nel A710-A e nel FeE420-KT. In particolare non si è riscontrata tenso-corrosione nell'intervallo considerato di ΔK .
- La polarizzazione catodica dei provini ha comportato una maggiore velocità di propagazione della cricca per bassi ΔK . Questo fenomeno può essere imputato ad infragilimento da idrogeno.
- In generale si è riscontrata una notevole difficoltà, dovuta al tipo di microstruttura dei tre acciai, nell'individuare gli esatti meccanismi di frattura mediante analisi micrografica.
- I modelli semiempirici studiati si sono rivelati affidabili anche nel caso di prove svolte in soluzione clorurata.

- L'equazione di Collipriest si e' rivelata tutt'ora quella di uso piu' generale tra quelle studiate.

Simbologia

a	incremento della lunghezza di cricca
$\left\{ \begin{array}{l} C \\ n \\ p \\ q \end{array} \right.$	costanti nelle equazioni semiempiriche
A	costante nella legge di variazione di ΔK_0
N	numero di cicli di sollecitazione
R	coefficiente di asimmetria
ΔK	ampiezza del fattore d'intensita' degli sforzi (S.I.F.)
ΔK_0	S.I.F. di soglia per sollecitazioni di fatica
K_0	S.I.F. di soglia per $R = 0$
K_c	S.I.F. critico per la frattura.

Bibliografia

- (1) L.Felloni, R.Fratesi, A.La Barbera, M.Marchetti, "Experimental and Numerical Analysis on Fatigue Crack Propagation on three Medium Strength Steels" presentato al "6 European Congress on Fracture", Amsterdam, Olanda, giugno 1986
- (2) Forman, R.G. e Hu, T., "Application of Fracture Mechanics on the Space Shuttle", ASTM STP Vol. 842, 1984, pp. 108-133
- (3) J.E. Collipriest, Jr., "An Experimentalist's View of the Surface Flaw Problem", North American Rocwell SD72CE12, 1972
- (4) AGARD, "Agard Corrosion Handbook Vol. I Aircraft Corrosion: Causes and Case Histories" AG-278 Vol. I, 1985.

Ringraziamenti:

Lavoro eseguito con fondi di ricerca M.P.I. 1985

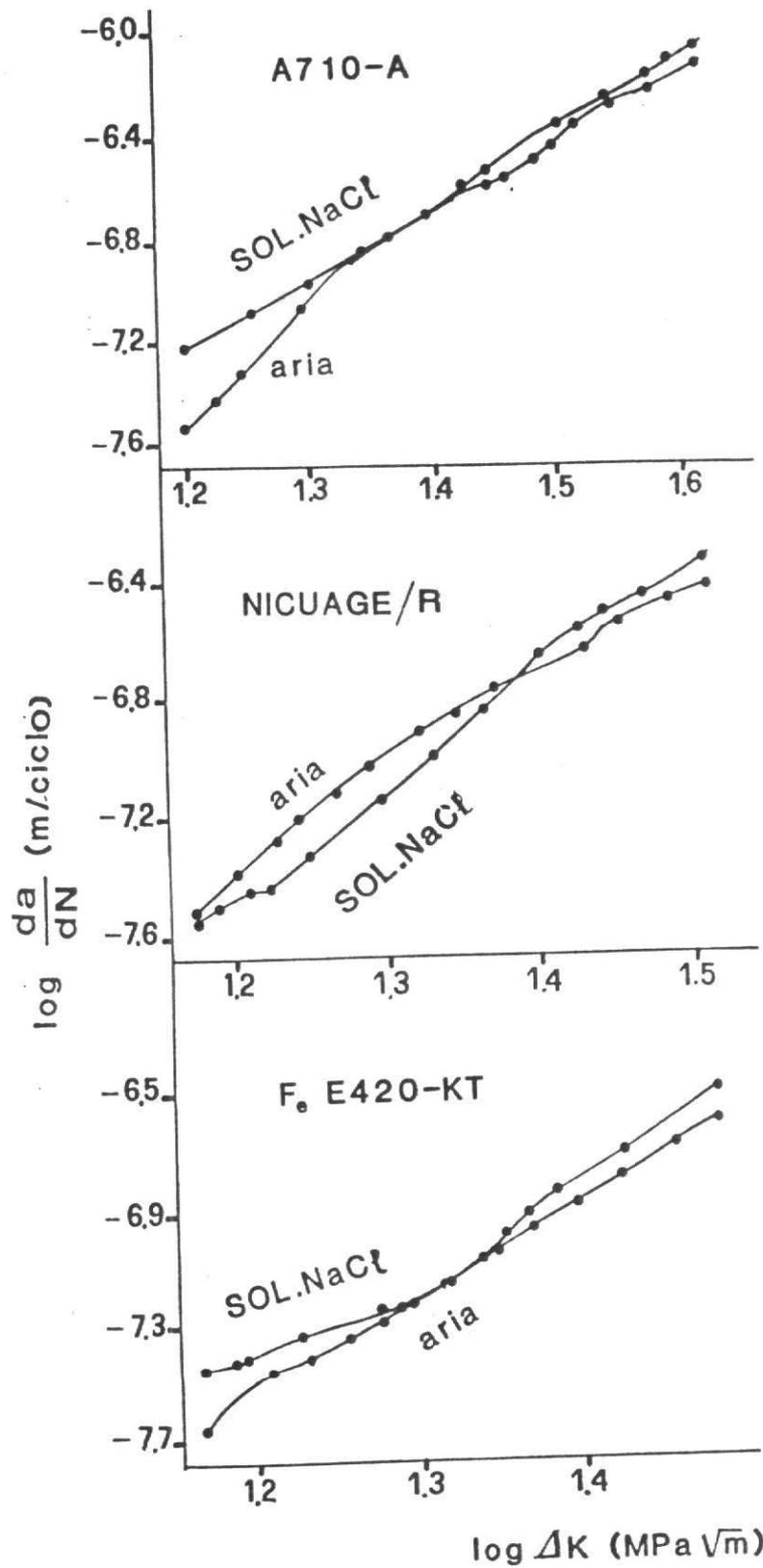


Fig.1 - Velocita' di propagazione della cricca ottenuta da prove eseguite in aria ed in soluzione aerata di NaCl al 3.5% .

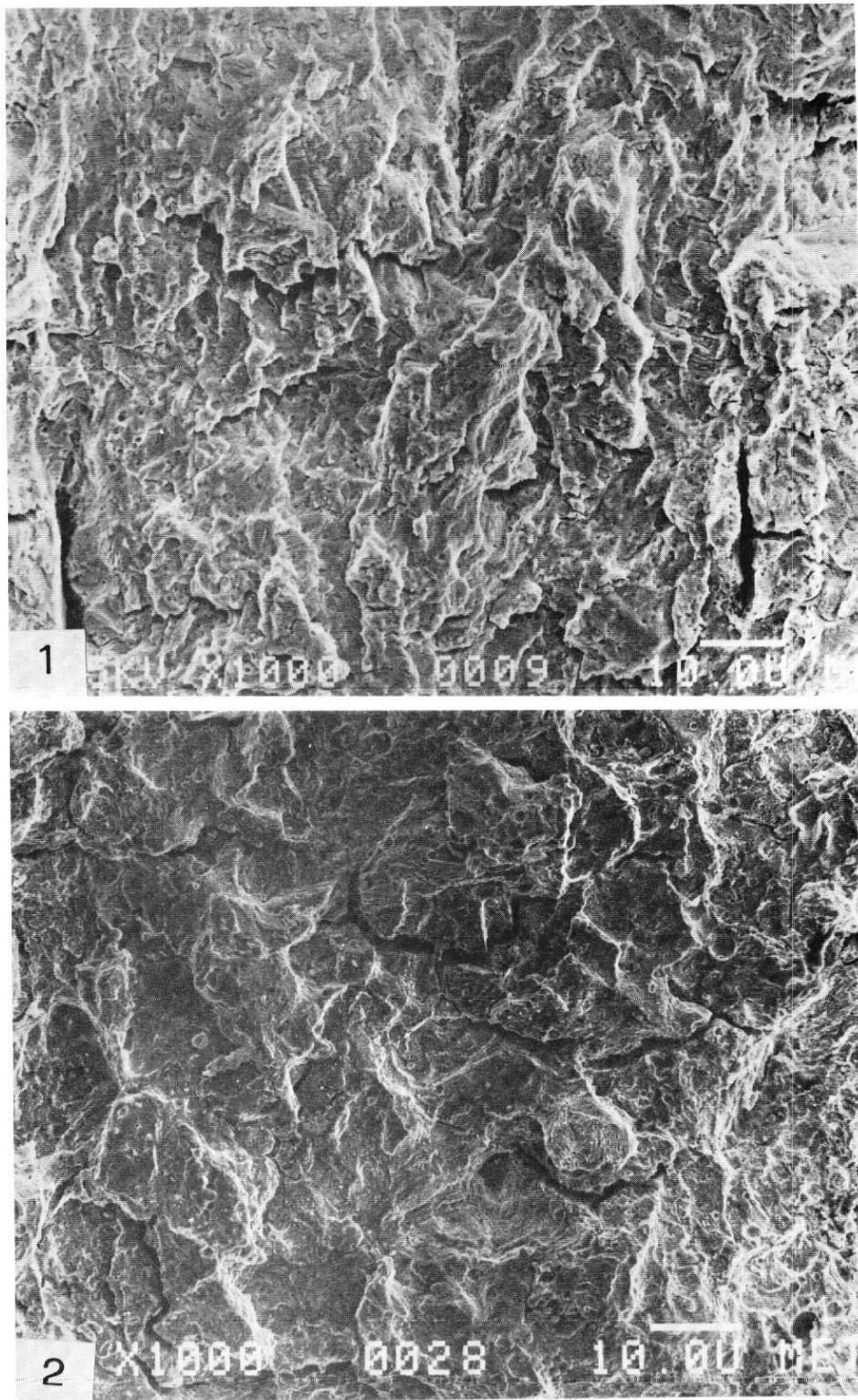
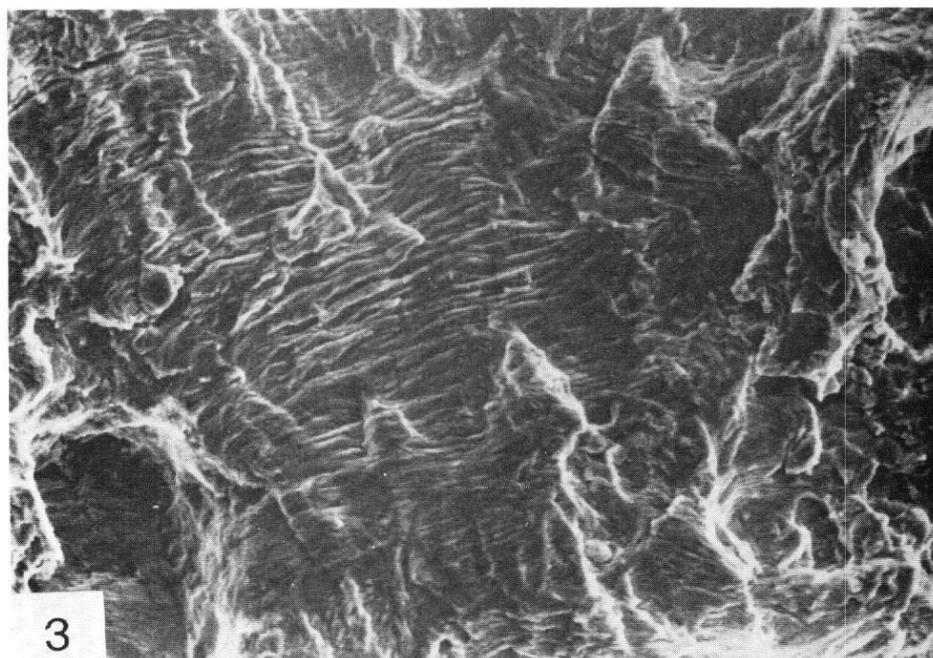
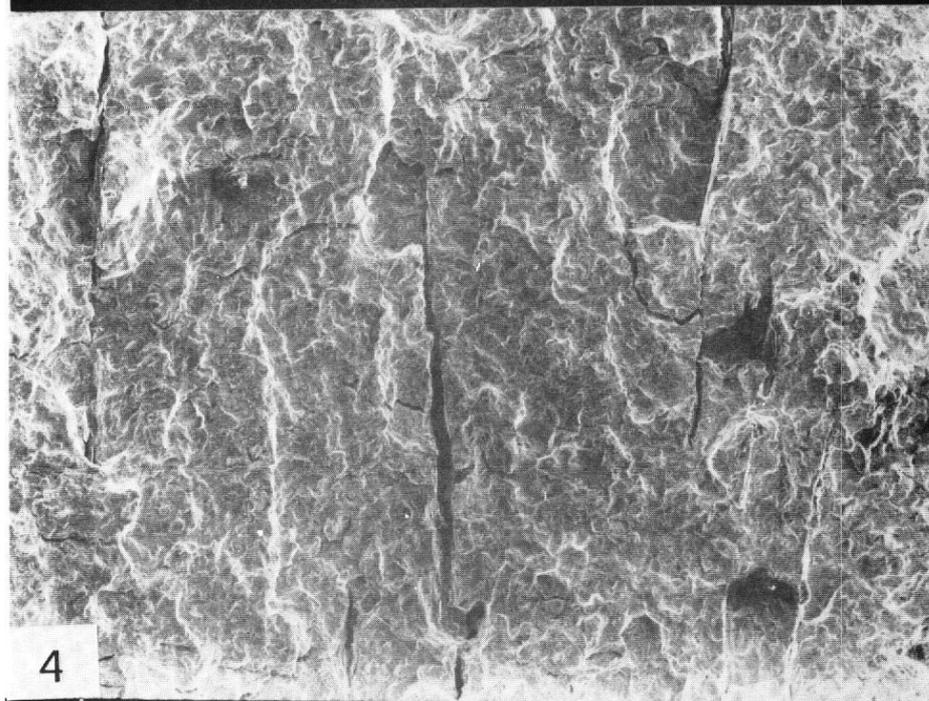


Fig.2 - Micrografie al SEM della superficie di frattura di provini in NICUAGE/R sollecitati in:
 1) aria di laboratorio; $\Delta K=22\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (frattura di tipo prevalentemente fragile e cricche intergranulari)
 2) soluzione NaCl 3.5% aerata; $\Delta K=15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.



X3000 0010 10.0U MET



KU X300 0013 100.0U METBO

Fig.3 - Influenza del ΔK sulla morfologia di frattura di campione FeE420-KT sollecitato in aria.
Foto 3 : $\Delta K=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (striature duttili di fatica)
Foto 4 : $\Delta K=28\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (rottura fragile e cricche secondarie longitudinali).

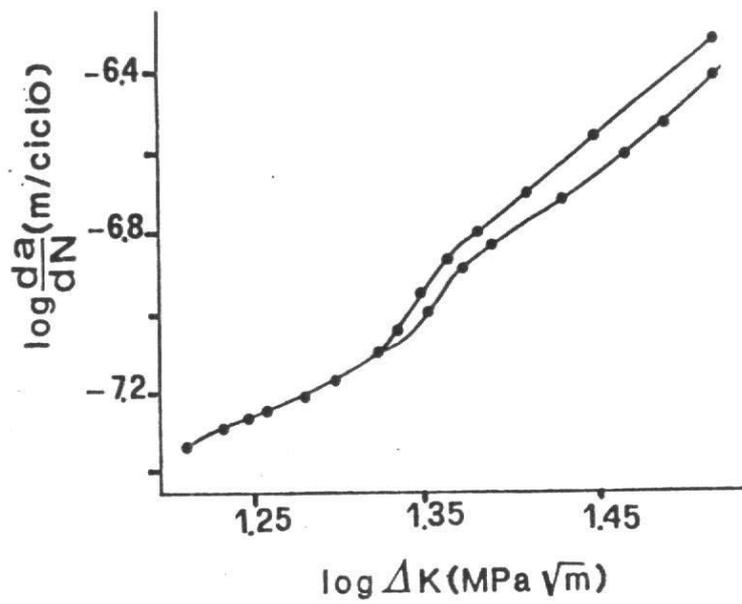


Fig.4 - Risultati sperimentali di due prove eseguite in identiche condizioni con provini in FeE420-KT in soluzione NaCl 3.5% aerata.

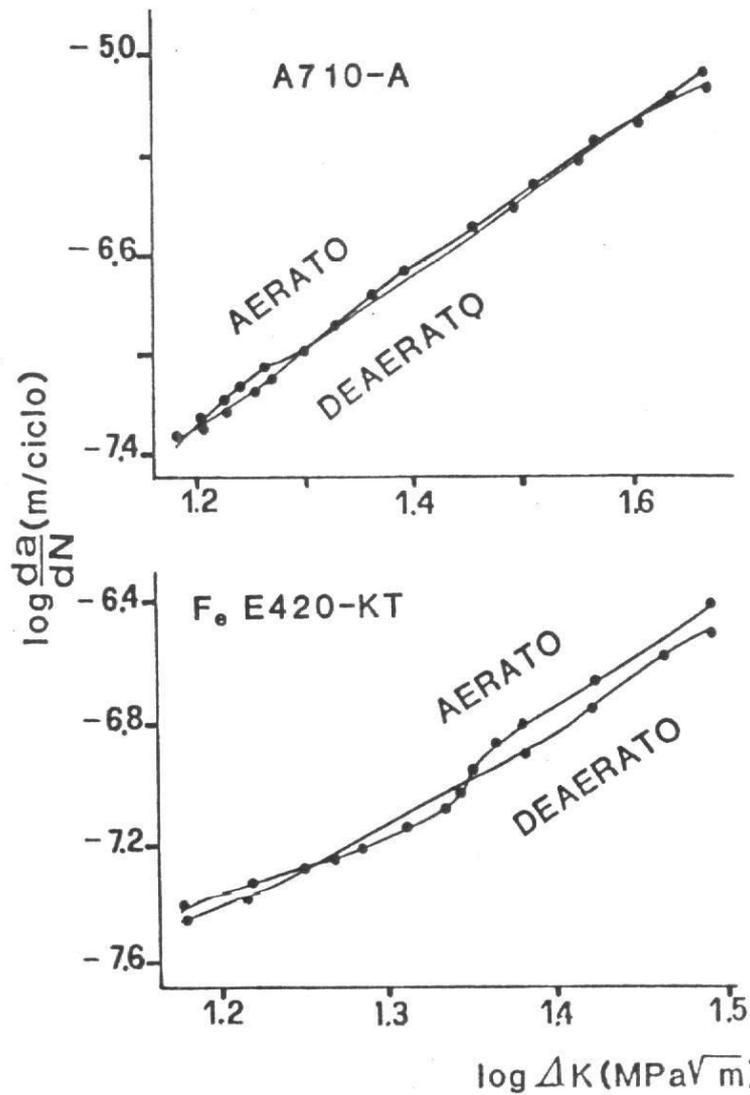


Fig.5 - Confronto delle velocità di avanzamento della cricca, desunte da prove eseguite in soluzione NaCl 3.5% aerata e deaerata.

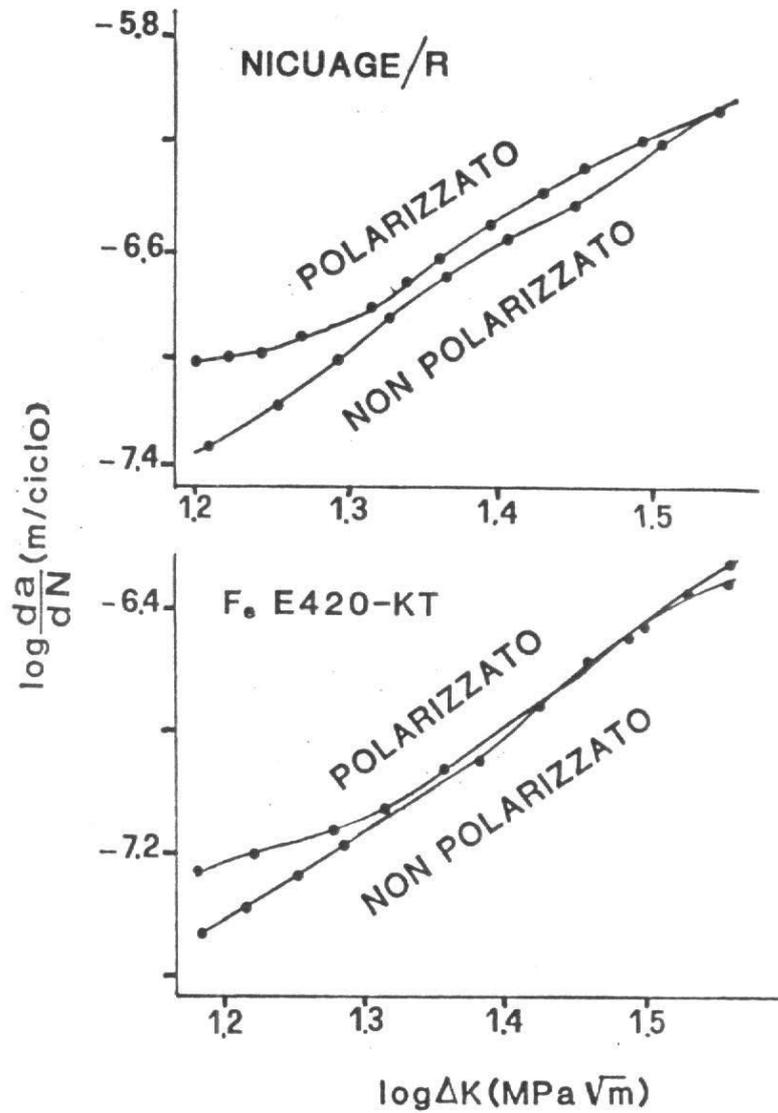


Fig.6 - Confronto risultati sperimentali di provini polarizzati (-1.125 V (ECS)) e non (soluzione NaCl 3.5% deaerata).

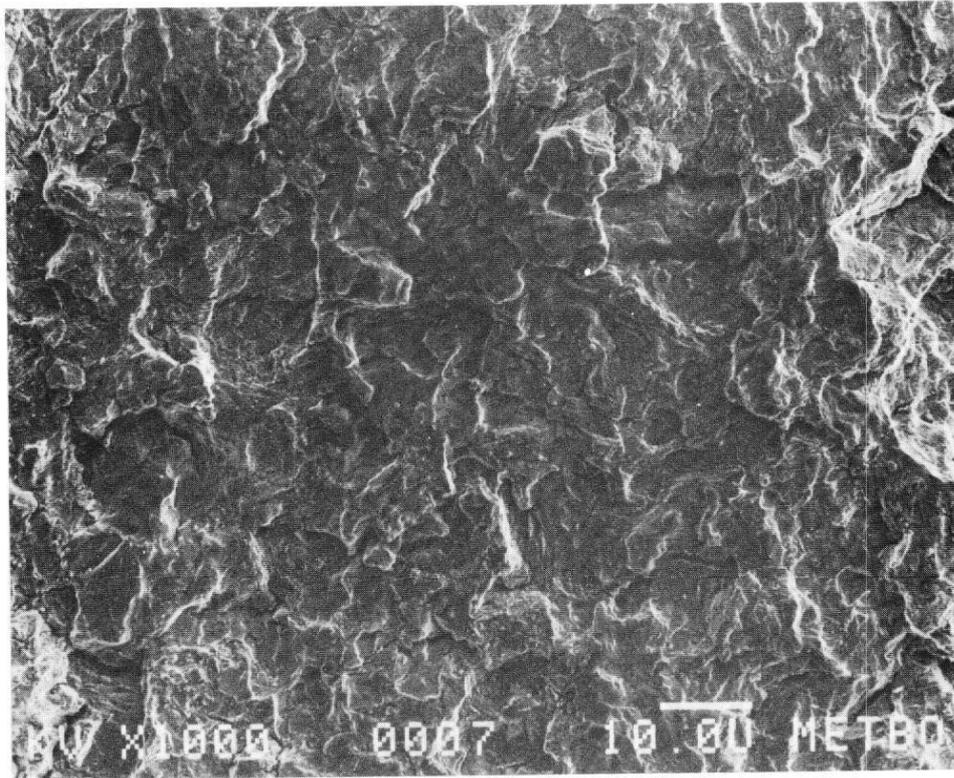


Fig.7 - Micrografia della superficie di frattura di un campione FeE420-KT sollecitato in sol. NaCl 3.5% deaerata e polarizzato catodicamente; $\Delta K=16\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (rottura fragile con numerose aree di quasi-clivaggio).

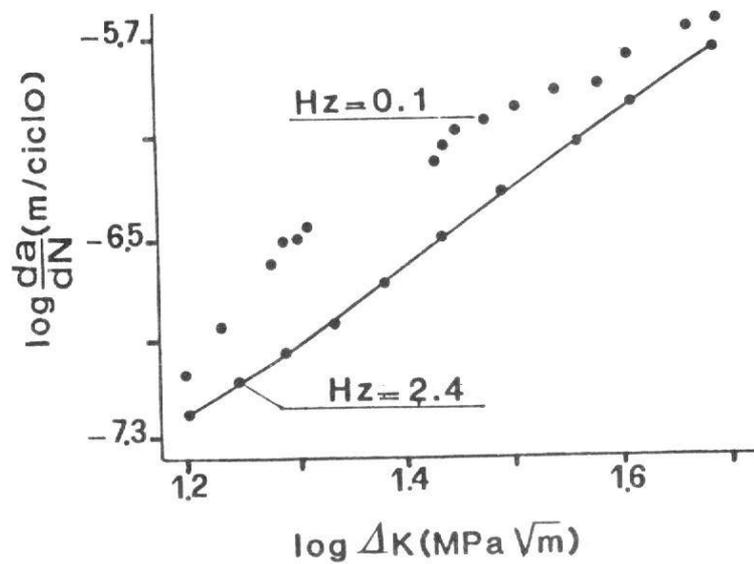


Fig.8 - Prove eseguite su A710-A in soluzione NaCl 3.5% aerata a 2 differenti frequenze.

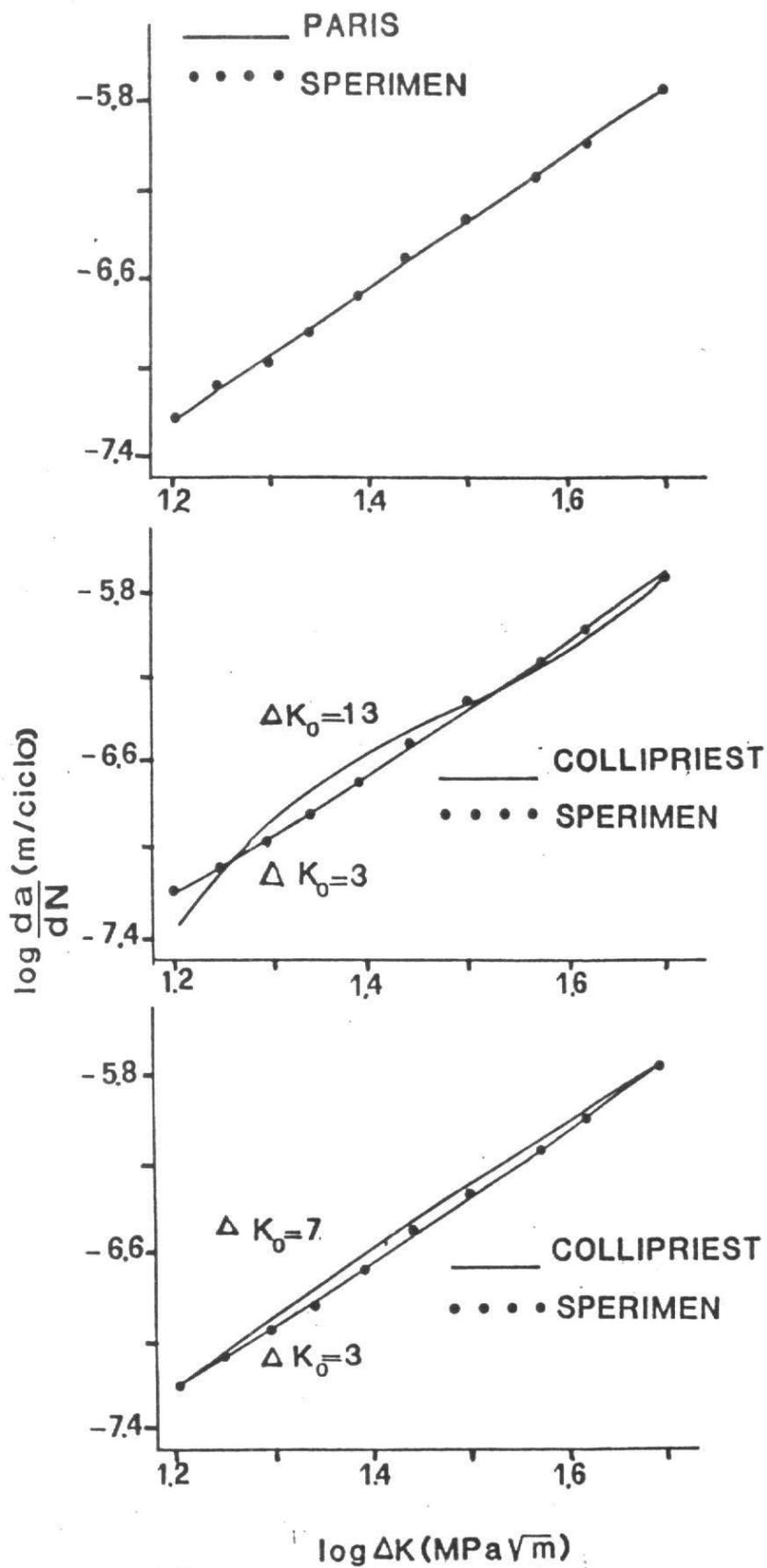


Fig.9 - Confronto delle velocità di propagazione della cricca in provini A710-A ottenute integrando le equazioni di Paris e Collipriest (dati sperimentali di partenza ottenuti in NaCl 3.5% aerato; supposto $K_L = 150 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

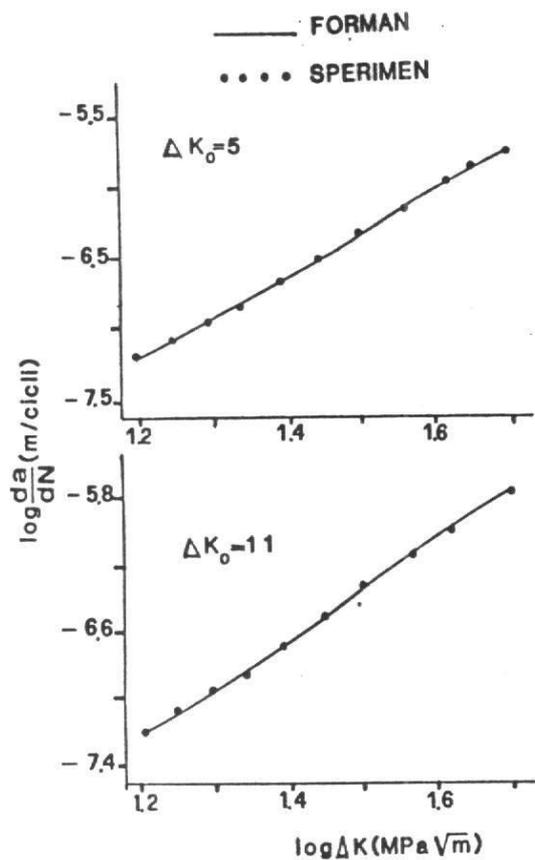


FIG 10

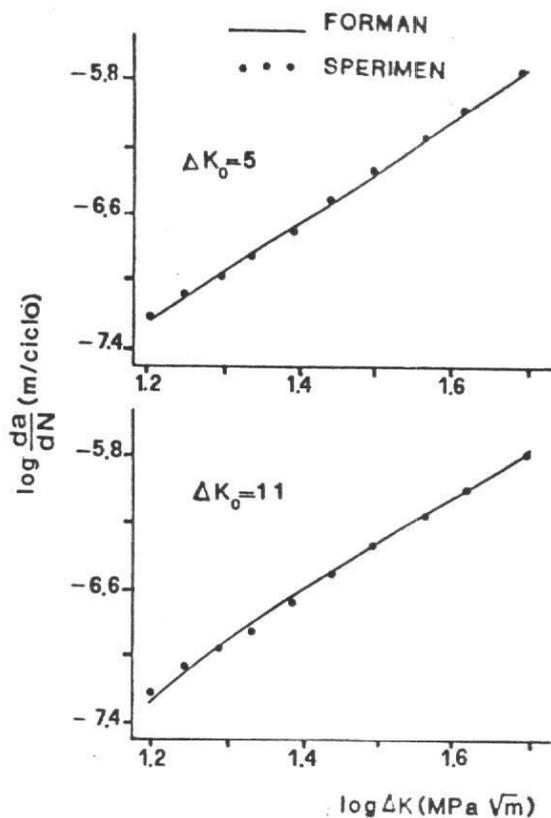


FIG 11

Fig.10 - Risultati sperimentali relativi a provini A710-A in NaCl 3.5% aerato confrontati con le curve ottenute dalla formula modificata di Forman (supposto $K_c = 150 \text{ MPa m}$).

Fig.11 - Confronto risultati sperimentali con la formula modificata di Forman avendo posto $p=1$, $q=1$ (altre variabili come in Fig.11).

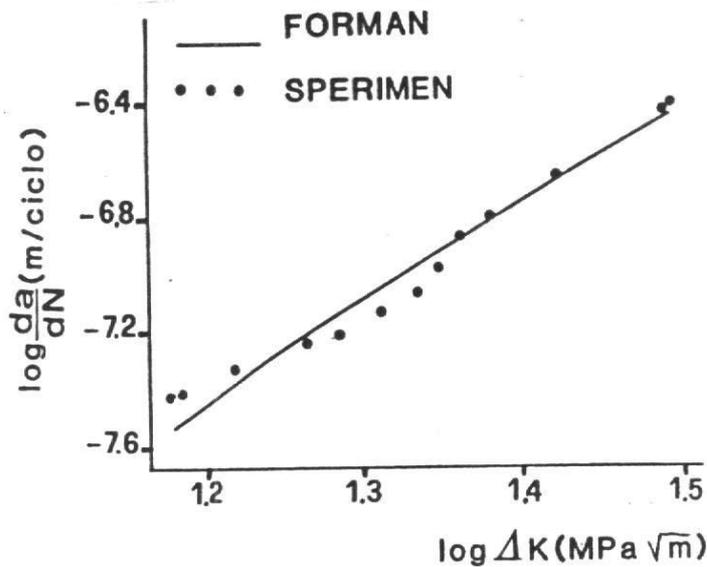


Fig.12 - Confronto delle velocità di propagazione della cricca come dedotte dalle prove sperimentali e come ottenute dall'equazione modificata di Forman ($p=1, q=1$; altre costanti ottenute dalle prove sperimentali con provino FeE420-KT in NaCl 3.5% aerato).

COMPUTATION OF GROWTH RATE CONSTANTS	
KC =	150.0
R =	.1713
DELTA K0 =	9.000
DA/DII	DELTA K
.3858-007	15.29
.4518-007	16.17
.5144-007	17.21
.5495-007	18.09
.5963-007	19.07
.6675-007	19.86
.7352-007	20.54
.8741-007	21.63
.1338-006	23.06
.1586-006	24.12
.1951-006	25.26
.2738-006	28.18
.3751-006	30.91
.4791-006	33.17
GROWTH RATE CONSTANTS:	
C =	.1844-076
H =	22.45
P =	-7.894
Q =	-24.08

Fig.13 - Risultati del programma per il calcolo delle quattro costanti dell'equazione di Forman per la prova sperimentale illustrata in Fig.12.

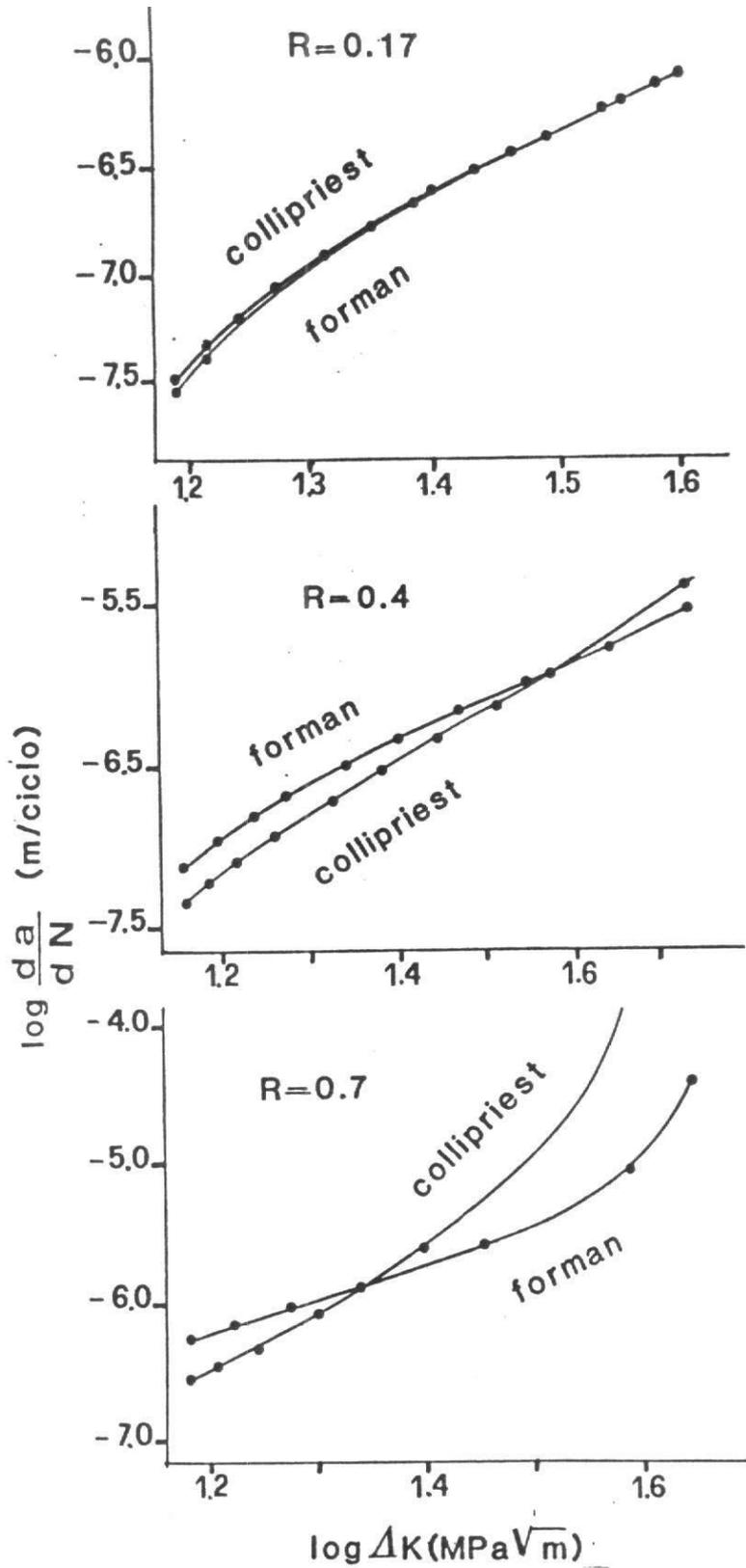


Fig.14 - Andamenti per R variabile della formula di Collipriest e Forman (costanti ottenute da prova sperimentale con provino A710-A in aria di laboratorio; R=0.17).

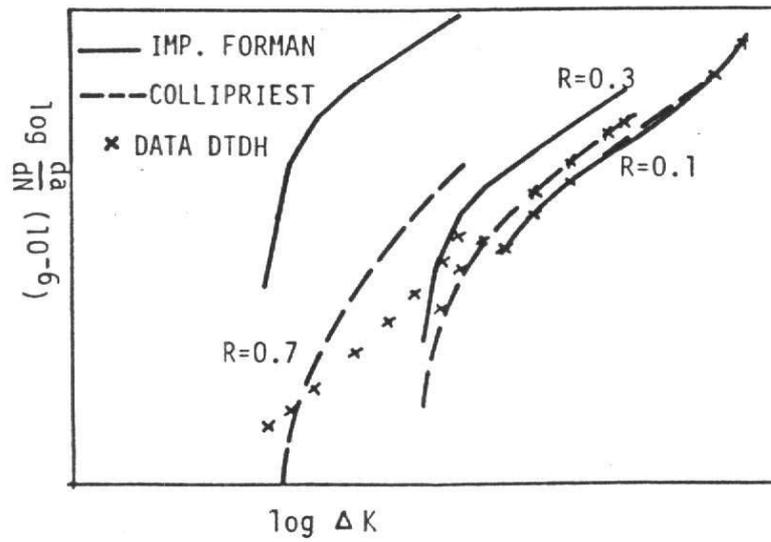


Fig.15 - Confronto, per R variabile, tra dati sperimentali, equazione di Collipriest ed equazione modificata di Forman (dati ESA-ESTEC).