

UTILIZZO DI CAMPIONI DI MECCANICA DELLA FRATTURA  
PER PROVE DI TENSOCORROSIONE: IL PROBLEMA  
DELLE CRICCHE RAMIFICATE.

G. Gabetta, M. Radaelli, A. Martinelli, CISE, Tecnologie Innovative, Milano  
S. Ragazzoni, ENEL DSR/CRTN, Milano

RIASSUNTO

Uno dei più diffusi metodi di prova per la tensocorrosione utilizza campioni precriccati di Meccanica della Frattura (tipo DCB), caricati a deformazione imposta costante tramite un cuneo forzato nell'intaglio meccanico e inseriti nell'ambiente aggressivo. Queste prove permettono di ricavare la velocità di crescita della cricca in funzione del  $K$  applicato; al crescere della cricca, dato che l'apertura del campione resta costante e la cedevolezza aumenta, il carico diminuisce con legge nota ed è quindi possibile in modo semplice conoscere l'andamento dello stato di sforzo all'apice della cricca.

La situazione di sforzo non è però più così semplice nel caso in cui la cricca si propaghi su due o più rami, caso non raro soprattutto per quanto riguarda certe coppie materiale-ambiente. In particolare, nell'ambito di un programma di ricerca ENEL/CRTN, al CISE sono state svolte prove su acciaio 18Mn-5Cr per anelli di blindaggio di alternatori. I campioni provati in acqua demineralizzata a 65 e 80 °C hanno nucleato cricche quasi sempre ramificate con due rami ed angoli maggiori di 45° rispetto al piano della pre-cricca di fatica.

E' perciò stato necessario mettere a punto un metodo che permettesse di stimare il valore di  $K$  all'apice di ciascun ramo della cricca; questo è stato fatto utilizzando sia soluzioni pubblicate in letteratura, che la misura di cedevolezza dei campioni effettuata prima e dopo la prova. Il metodo, descritto nel presente lavoro, ha permesso di ottenere dalle prove informazioni più precise sul comportamento del materiale in questione.

1. INTRODUZIONE

Per valutare il comportamento a tensocorrosione di materiali sottoposti a carichi in presenza di ambiente aggressivo, vengono comunemente usati campioni e tecniche della Meccanica della Frattura. In particolare, vengono utilizzati campioni (WOL o DCB) che, dopo essere stati caricati tramite l'inserimento di un cuneo, sono posti nell'ambiente in esame per tempi variabili. Il monitoraggio della crescita della cricca, effettuato di solito otticamente, permette di ottenere misure della velocità di crescita della cricca stessa, in funzione del fattore di intensificazione degli sforzi  $K$ , calcolato a partire dal valore di deformazione (costante) e dalla lunghezza del difetto.

Per alcuni materiali, però, il discorso si complica dato che le cricche generate per tensocorrosione sono ramificate; il calcolo del fattore di intensificazione degli sforzi in questi casi è più difficile e spesso viene risolto in modo semplificato (1); è invece importante sviluppare un metodo che permetta di ottenere i valori reali di carico e di fattore di intensi-

ficazione degli sforzi all'apice di questi difetti, per poter trasferire i risultati ottenuti sul campione al caso di componenti, o anche soltanto per poter confrontare il comportamento di diversi materiali.

Il lavoro descritto nella presente memoria ha riguardato l'acciaio austenitico 18Mn-5Cr, provato al CISE nell'ambito di un programma di ricerca ENEL-CRTN per anelli di blindaggio di turboalternatori (2); questo materiale è notevolmente suscettibile alla tensocorrosione (3-4) e presenta cricche in generale ramificate, anche se con andamento abbastanza riproducibile; questo rende difficoltoso il calcolo di  $K_{ISCC}$ .

Alcuni metodi per il calcolo di K nel caso di cricche ramificate sono disponibili in letteratura (5-6), basati su calcoli agli elementi finiti; in questi casi ci si riferisce però a cricche ideali. Una cricca reale si discosta da quelle considerate in letteratura, in quanto l'andamento è piuttosto irregolare, le ramificazioni possono essere più di una, e la lunghezza dei singoli rami non è sempre paragonabile. Si è perciò voluto arrivare ad un calcolo del K che utilizzi il più possibile metodi sperimentali; in particolare, il K è stato calcolato da misure di cedevolezza; i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli stimati usando i già citati metodi di letteratura.

## 2. PARTE SPERIMENTALE

### 2.1. Prove di tensocorrosione

Le prove sono state effettuate utilizzando provini di tipo CT (secondo ASTM E399) con spessore ridotto ( $B = 12.5$  mm ;  $W = 50.8$  mm); l'ambiente utilizzato è costituito da acqua alla temperatura di 65° C con gorgogliamento di una miscela di gas costituita da  $O_2$  al 20% ,  $CO_2$  al 5% e il resto  $N_2$ . Durante la prova vengono effettuate misure di conducibilità e pH della soluzione: le Fig. 1 e 2 mostrano l'andamento di queste variabili nel tempo.

I campioni, prima di essere caricati, vengono precriccati per fatica in aria a temperatura ambiente, con carico massimo di 7.5 kN, rapporto R di 0.1, e frequenza di 5 Hz. La precricatura si estende per una lunghezza di 2-2.5 mm.

Dopo precricatura, viene misurata la cedevolezza di ogni campione: la misura dell'apertura del campione viene determinata con un trasduttore di spostamento di tipo LVDT montato sulla bocca dell'intaglio. I campioni vengono caricati tramite l'inserimento di un cuneo nell'intaglio meccanico, secondo quanto schematizzato in Fig.3. Ogni campione, montato su una macchina di prova MTS, viene portato in controllo di spostamento, al livello di carico voluto (misurato dalla cella di carico); il cuneo viene quindi forzato nell'intaglio sino ad ottenere l'annullamento del carico letto dalla macchina.

Nel calcolo del carico effettivo imposto al campione, si deve tener conto del contributo della deformazione della catena di carico; a questo scopo viene misurata anche la cedevolezza di tutto il sistema, come pendenza della curva carico-spostamento , ottenuta utilizzando lo spostamento del pistone della macchina.

In questo modo è possibile determinare il carico effettivo applicato al campione e quindi calcolare il valore del fattore di intensificazione degli

sforzi a fondo intaglio ( $K$  in  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

I campioni caricati vengono introdotti nell'ambiente di prova; dopo un certo tempo, essi vengono estratti e scaricati; ne viene quindi misurata la cedevolezza. Le cricche vengono misurate otticamente sul fianco dei campioni; alcuni campioni vengono rotti in azoto liquido e le superfici di frattura vengono esaminate al SEM (3). Tutte le cricche hanno evidenziato una propagazione per SCC di tipo intergranulare, caratteristica di questo materiale nell'ambiente considerato.

Sono stati provati in tutto 6 campioni; i dati relativi sono riassunti in Tabella 1.

## 2.2. Dati di letteratura per cricche ramificate

I dati di tensocorrosione ricavati da campioni di meccanica della frattura consentono di ricavare curve che esprimono la velocità di crescita della cricca in funzione del  $K$  applicato; nel caso dei campioni caricati con cuneo, il valore di  $K$  finale si calcola a partire dal carico residuo (ottenuto con l'ipotesi che l'apertura del campione sia costante) e dalla lunghezza della cricca. Nel caso in cui le cricche ottenute siano ramificate, in genere si consiglia di moltiplicare il valore di  $K$  per un fattore correttivo, in particolare per  $1/\sqrt{2}$  nel caso, più frequente, di due soli rami principali (1).

Il valore di questo fattore correttivo può anche essere valutato in modo più preciso, utilizzando alcuni dati di letteratura. In particolare, per cricche con due rami simmetrici è possibile utilizzare il grafico riportato in Fig.4 (5), che vale per cricche piuttosto lunghe; per cricche corte, o meglio per cricche con ramificazioni di lunghezza molto minore di quella della cricca principale o della precriccatura, esiste una trattazione agli elementi finiti (6), che esamina con una certa precisione il caso di ramificazioni multiple e dà il fattore correttivo in funzione dell'angolo tra i rami (sempre sotto l'ipotesi di ramificazioni simmetriche).

A nostro parere, il metodo per cricche corte va applicato all'inizio della prova; si può infatti ragionevolmente supporre che non appena si formano i primi segmenti di cricca ramificata, il  $K$  all'apice di ciascuna cricca diminuisca di un fattore che dipende dall'angolo tra i rami; in pratica, il  $K$  iniziale applicato al campione non è quello calcolato sotto l'ipotesi dell'esistenza della sola precricca, ma quello calcolato tenendo conto della ramificazione (vedi Tab.2).

Per quanto riguarda invece la stima del  $K$  finale, è importante conoscere il valore del carico residuo e la configurazione delle cricche alla fine della prova. Da questi dati, applicando la correzione per cricche lunghe (5), si può valutare il  $K$  finale.

## 3. RISULTATI OTTENUTI

Dopo circa 15 giorni di permanenza in ambiente, tutti i campioni presentavano cricche di lunghezza dell'ordine del millimetro inoltre la velocità di crescita rilevata otticamente mostrava una evidente diminuzione. In tutti i campioni, le cricche erano ramificate sin dall'inizio della propagazione, e mostravano due rami principali e separati dal piano della cricca di fatica da angoli maggiori di  $45^\circ$ . In Fig.5 sono schematicamente riportate le

configurazioni delle cricche, misurate sui due fianchi di ciascun campione. Noto lo sviluppo di cricca è possibile calcolare il valore medio della velocità di propagazione nel caso della prova; la Fig.6 riassume l'andamento delle velocità di propagazione in funzione di  $K_{eff}$  all'inizio ed alla fine della prova. Il calcolo dei  $K_{eff}$  è esposto nei paragrafi successivi.

I dati ottenuti sono in accordo con quelli precedenti (2-3) e con quelli di letteratura (4).

Inoltre, in Tabella 1 sono riportati i valori di  $K$  iniziale calcolati con la formula per i campioni CT, ed in Tabella 2 quelli corretti tenendo conto della presenza di una piccola cricca ramificata. Si può notare che la differenza è significativa.

La valutazione del fattore di intensificazione degli sforzi a fine prova è stata effettuata utilizzando due procedure i cui risultati sono poi stati confrontati:

1) si è sostituita la lunghezza delle cricche presenti in ogni campione con quella di una sola cricca "equivalente", determinata dalla misura sperimentale della cedevolezza finale; con questa ipotesi, si è potuto calcolare il carico applicato al campione a fine prova, e il valore di  $K$  corrispondente.

2) si è utilizzata la Energy Release Rate  $G$  di Griffith e la sua variazione con il crescere della cricca.

### 3.1. Metodo delle cricche equivalenti

A fine prova è stata misurata sperimentalmente la cedevolezza del campione. Utilizzando le formule teoriche di Saxena-Hudak (7) è possibile risalire dalla cedevolezza ad una lunghezza di cricca corrispondente; pur essendo infatti la cricca reale ramificata e quindi non paragonabile a quelle usate per la calibrazione della cedevolezza, il campione si comporta all'esterno come se contenesse una cricca sola della lunghezza calcolata.

Il carico residuo finale sul campione viene quindi calcolato utilizzando la cedevolezza misurata a fine prova, con l'ipotesi che l'apertura sulla linea di carico sia rimasta costante. Il  $K$  è poi calcolato con la formula per i campioni CT (ASTM E399), considerando il valore di carico finale così ottenuto e la lunghezza di cricca equivalente; per tener conto della biforcazione è stata poi applicata la correzione per cricche lunghe (5), ricavata dal grafico in Fig.5. In Tabella 3 sono riportati i valori di cedevolezza iniziale e finale per ciascun campione, con i corrispondenti valori di  $a_{equivalente}$ . In Tabella 4 sono riportati i valori di  $K$  finali e corretti ( $K_{eff}$ ) per tener conto della ramificazione dai quali si può notare come i  $K$  finali corretti sono ragionevolmente vicini al  $K_{ISCC}$  di questo materiale, che è inferiore a  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (4).

### 3.1. Metodo della Energy Release Rate $G$

Si è voluto applicare un approccio energetico allo scopo di aggirare le difficoltà inerenti al calcolo del  $K_I$  effettivo usando i concetti basilari della Meccanica della Frattura. Si è utilizzata la Energy Release Rate  $G$ , o energia disponibile alla frattura per unità di incremento superficiale della cricca. Lo schema è il seguente: si valuta  $K_I$  dalla formula classica:

$$K_I = (G * E')^{0.5} \quad (1)$$

$$E' = \begin{cases} E & \text{per sforzo piano} \\ E/(1-\gamma^2) & \text{per deformazione piana} \end{cases}$$

L'energia per unità di superficie  $G$  è stata valutata calcolando la differenza tra le energie elastiche di due situazioni corrispondenti a lunghezze di cricca  $a_i$  ed  $a_f$  (Fig.7) e facendone il rapporto con " $B * a$ ", dove  $B$  è lo spessore del campione e  $a$  è la differenza " $a_f - a_i$ ". Dalla figura 7 si ottiene:

$$G = \Delta A / B * \Delta a \quad (2)$$

$$\Delta A = P_i * \sigma / 2 - P_f * \sigma / 2 \quad (3)$$

considerando poi che:

$$\sigma = C * P \quad (4)$$

dalla (3) si ottiene:

$$G = \frac{P_i * C_i * \Delta C}{2 * B * C_f * \Delta a} \quad (5)$$

dove:

$$\Delta C = C_f - C_i$$

$$a_f = a_i - \Delta a$$

con  $a$  si indica la somma di tutti i contributi di propagazione nei vari "rami" della cricca. Per piccole propagazioni della cricca, il valore dei  $G$  così ottenuto è da ritenersi vicino al suo valor medio tra le due situazioni iniziale e finale. Possiamo scrivere così:

$$G = \frac{G_i + G_f}{2} \quad (6)$$

Si ha inoltre:

$$G = 1/2 * P^2 / B * (dC/da) \quad (7)$$

da cui si ottiene:

$$G_i / G_f = (P_i / P_f)^2 * (dC_i / da) * (da / dC_f) \quad (8)$$

Se le cricche iniziali e finali non differenziano molto tra di loro, dalla (8) si ottiene (per spostamento costante)

$$G_i / G_f = (C_f / C_i)^2 \quad (9)$$

dove si è considerato che:

$$\frac{dC_i}{da} \approx \frac{dC_f}{da}$$

dalle (9) e (6) otteniamo infine:

$$G_f = \frac{2}{1+(C_f/C_i)^2} * \bar{G} \quad (10)$$

$$G_i = \frac{2}{1+(C_i/C_f)^2} * \bar{G} \quad (11)$$

e dalle (10) ed (11) i valori di  $K_{Ii}$  e  $K_{If}$  applicando la (1).

I risultati sono riportati in Tabella 5 e da un confronto con le Tabelle 1 e 4 risulta che il metodo energetico proposto è da ritenersi equivalente al calcolo del  $K_I$  senza correzioni dell'angolo, nei limiti della precisione sperimentale nel considerare le cedevolezza dei singoli campioni.

#### 4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I risultati ottenuti e riassunti nelle Tabelle 1-6 permettono di fare alcune considerazioni sull'utilizzo di tecniche di Meccanica della Frattura in prove di tensocorrosione.

Prima di tutto, va riconosciuta l'importanza di mettere a punto metodi abbastanza semplici ma sufficiente precisi per la valutazione dei parametri meccanici, nel caso di presenza di anomalie come quella delle cricche ramificate. Le prove di tensocorrosione infatti hanno lo scopo di ottenere dati applicativi, che devono poter essere trasferibili in modo significativo a componenti reali.

Il caso presentato in questo lavoro, pur essendo trattato più dal punto di vista del corrosionista che da quello del meccanico, ha evidenziato che esistono materiali per cui la fase di propagazione della cricca segue regole ben precise: il materiale esaminato ha infatti mostrato una cricca nel piano mediano soltanto in un provino, su più di venti sottoposti a carico con modalità analoghe.

I lavori di letteratura esaminati, ed il contributo dell'attività sperimentale descritta, hanno evidenziato in particolare che il valore di  $K$  inizialmente imposto al campione va valutato tenendo conto della direzione in cui si muove la cricca; anche perchè la scelta di tale direzione non è sicuramente casuale, ma dovuta ad un ben preciso meccanismo di tipo corrosivistico, quale la dissoluzione preferenziale a bordo grano.

Per quanto riguarda lo stato di carico a fine prova, i due metodi usati sono paragonabili. Un ulteriore affinamento dei metodi di calcolo per la valutazione della effettiva distribuzione del campo di  $K$  potrebbe portare un contributo alla comprensione dei meccanismi di interazione tra l'effetto dell'ambiente e quello della situazione di sforzo all'apice di una cricca.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- (1) Speidel, M.O. "Stress corrosion cracking and corrosion fatigue-fracture mechanics", in "Corrosion in power generating equipment" , Plenum Press, 1984.
- (2) G.Gabetta, M.M.Radaelli, S.Ragazzoni, F.Bregani, V.Scolari, "Stress corrosion behaviour of material for generator retaining rings", 11° Congresso Internazionale di Corrosione Apr. (1990)
- (3) G. Gabetta, E. Lucon, C. Rinaldi, Rapporto Finale CISE 5510, 1990
- (4) M.O.Speidel "Nicht magnetisierbar stähle für generator-kappenringe, ihr widerstand gegen spannungsrißkorrosion und wasserstoffversprodung." VGB Kraftwerkstechnik 61, numero 12, Dicembre 1981.
- (5) Gerberich, W.W. and Jatavallabhula, K., "Quantitative Fractography and Dislocation Interpretations of the Cyclic Cleavage Crack Growth Process" Acta Metallurgica, Vol.31, pp.241-255 (1983)
- (6) W.K.WILSON and J. Cherepko, "Analysis of cracks with multiple branches" International Journal of Fracture, Vol.22, pp.303-315 (1983)
- (7) A. Saxena, S.J. Hudak, " Review and extension of compliance information for common crack growth specimens" I.J.of Fracture, Vol.14, Oct. 1978

TABELLA. 1

Sigla Camp.	$a_o$ (mm)	$P_i$ (kN)	$K_i$ (MPa $\sqrt{m}$ )
701	16.890	22.080	47.893
702	16.992	21.583	47.058
721	16.978	29.246	63.084
722	19.950	24.720	62.651
791	16.780	38.349	82.719
792	17.135	27.581	60.568

TABELLA 2

SIGLA Camp.	$2\theta$ gradi	$K_{eff}^i$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$K_{eff}/K_I$
701	-----	-----	-----
702	136.337	29.835	0.634
721	136.362	39.869	0.632
722	128.740	40.723	0.650
791	137.685	57.031	0.629
792	136.632	38.280	0.632

$a_o$  = Cricca iniziale

$P_i$  = Carico iniziale

$K_{eff}/K_I$  = Fattore correttivo ref.(6)

$K_i$  = K iniziale



TABELLA 3

SIGLA Camp.	$(BEV_x/P)_i$	$(BEV_x/P)_f$	$a_{feq.}$ (mm)	$P_f$ (kN)
701	52.24	54.066	17.272	21.334
702	52.37	64.887	20.320	17.423
721	51.68	79.259	23.370	19.069
722	63.81	83.999	23.876	18.779
791	51.58	63.773	20.117	31.017
792	52.90	69.218	21.336	21.079

TABELLA 4

SIGLA Camp.	$K_f$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$K_{eff}/K_I$	$K_{efff.}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
701	47.175	-----	-----
702	45.013	0.34	15.304
721	58.069	0.34	18.044
722	58.859	0.38	22.366
791	79.293	0.32	25.374
792	57.447	0.34	19.532

$(BEV_x/P)_i$  = Cedevolezza iniziale

$P_f$  = Carico finale

$(BEV_x/P)_f$  = Cedevolezza finale

$a_{feq.}$  = Cricca finale equivalente

$K_{eff}/K_I$  = Fattore correttivo ref.(5)

TABELLA 5

SIGLA Camp.	$\bar{G}$ MN/m	$G_i$ MN/m	$G_f$ MN/m	$\bar{K}$ MPa* $\sqrt{m}$	$K_i$ MPa* $\sqrt{m}$	$K_f$ MPa* $\sqrt{m}$
701	-----	-----	-----	-----	-----	-----
702	0.011	0.0135	0.0087	53	59	48
721	0.0074	0.0090	0.0058	43.9	48.7	38.84
722	0.023	0.0290	0.0170	77	86	65
791	0.018	0.022	0.0140	68.9	75.8	61
792	0.0135	0.0171	0.0099	59	66.6	50.7

TABELLA 6

SIGLA Camp.	$a_{tot}$ (mm)	T (ore)	da/dt (mm/sec)
701	-----	280	-----
702	5.4430	340	$2.23 \cdot 10^{-6}$
721	13.621	280	$6.75 \cdot 10^{-6}$
722	4.880	340	$1.99 \cdot 10^{-6}$
791	9.881	340	$4.03 \cdot 10^{-6}$
792	9.610	280	$4.77 \cdot 10^{-6}$

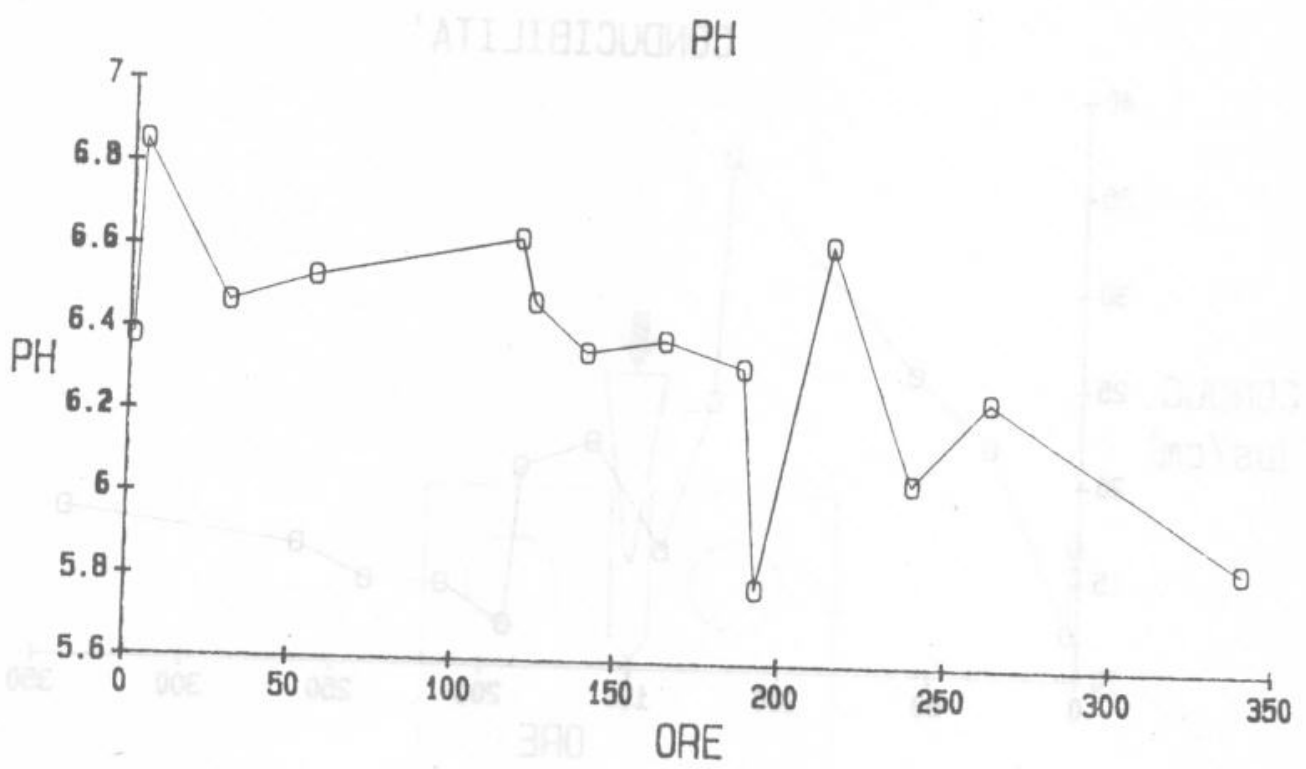


Fig.1 : Andamento del pH della soluzione in funzione del tempo.

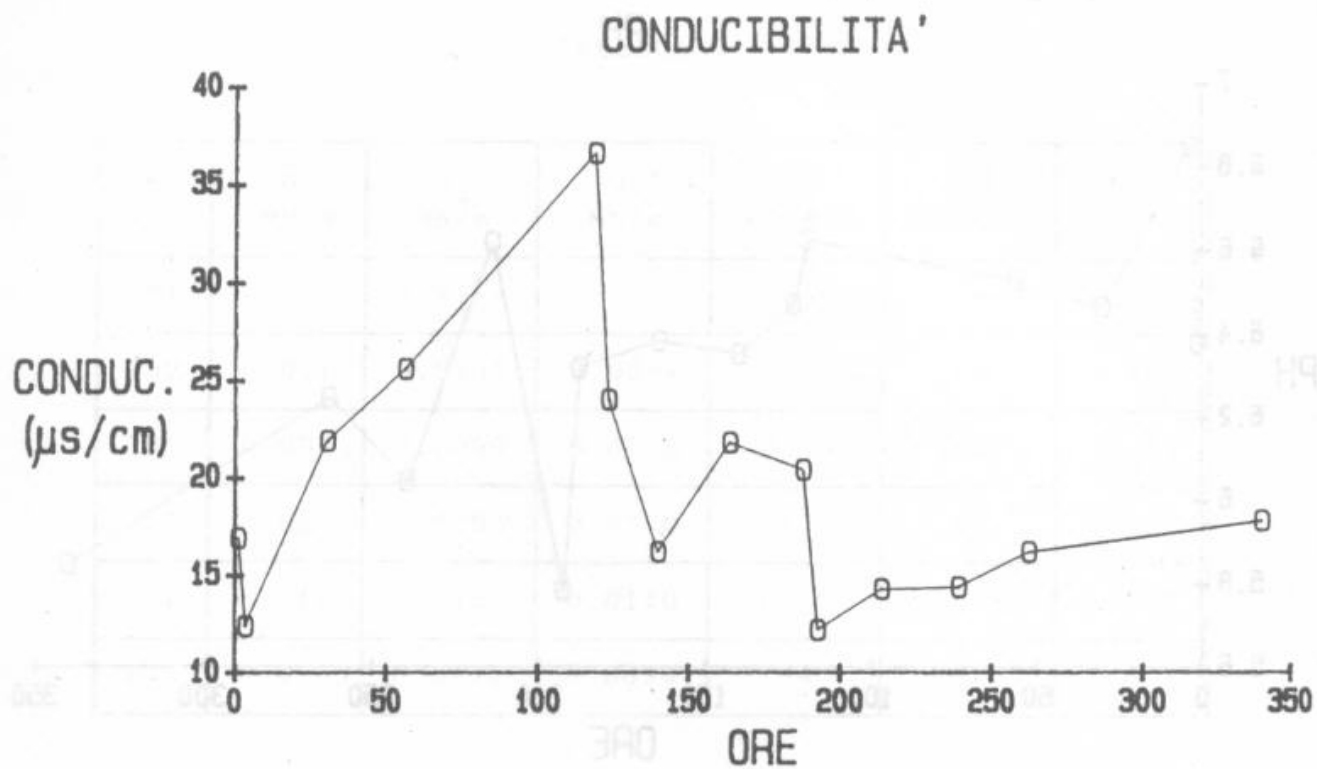


Fig.2 : Andamento della conducibilità in funzione del tempo.

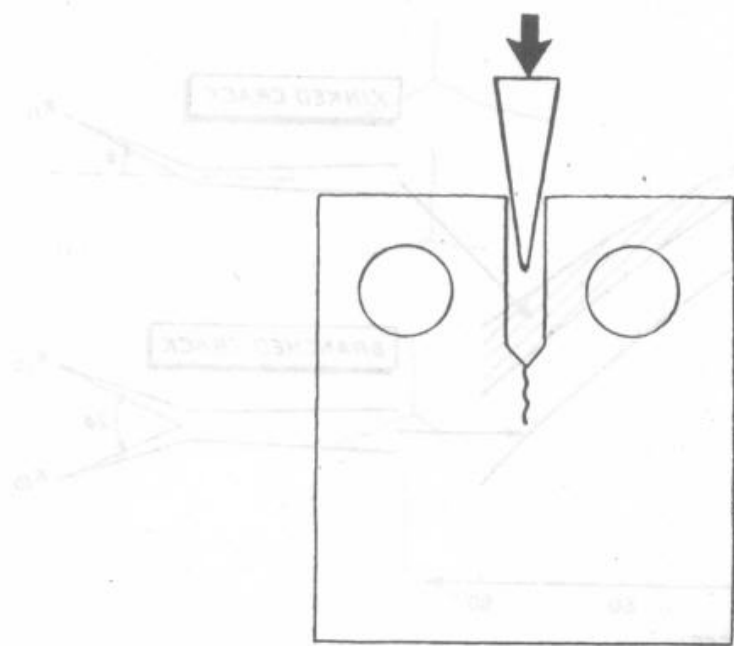


Fig.3 : Schema semplificativo del metodo di prova adottato.

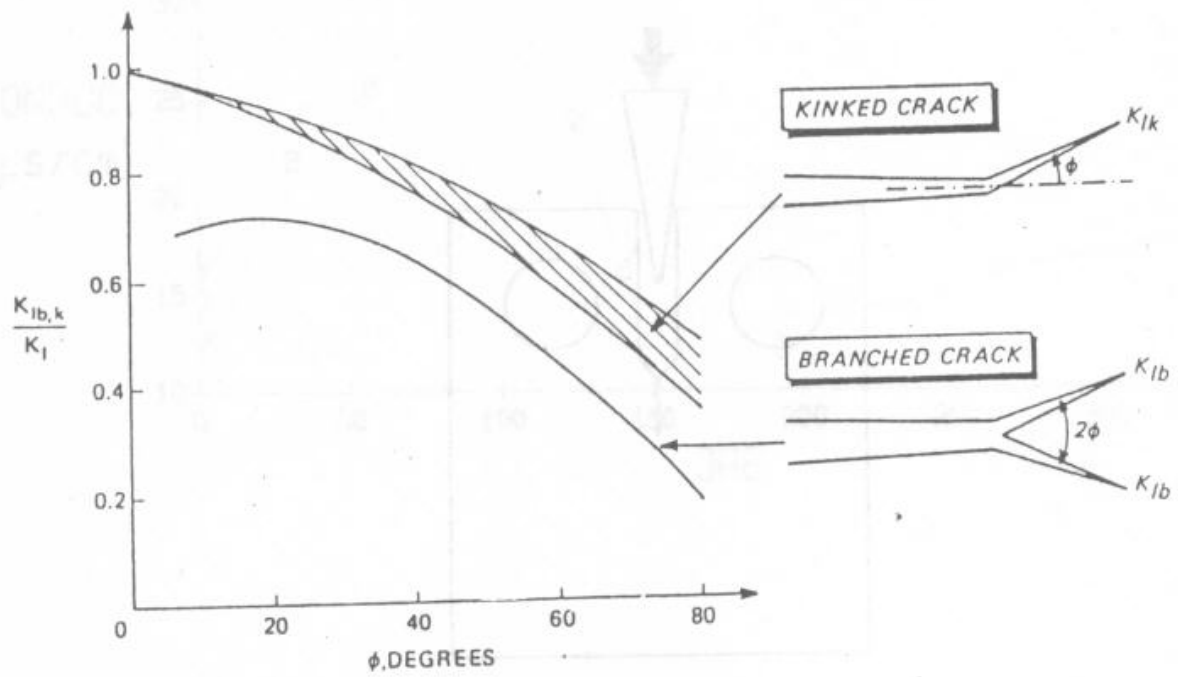
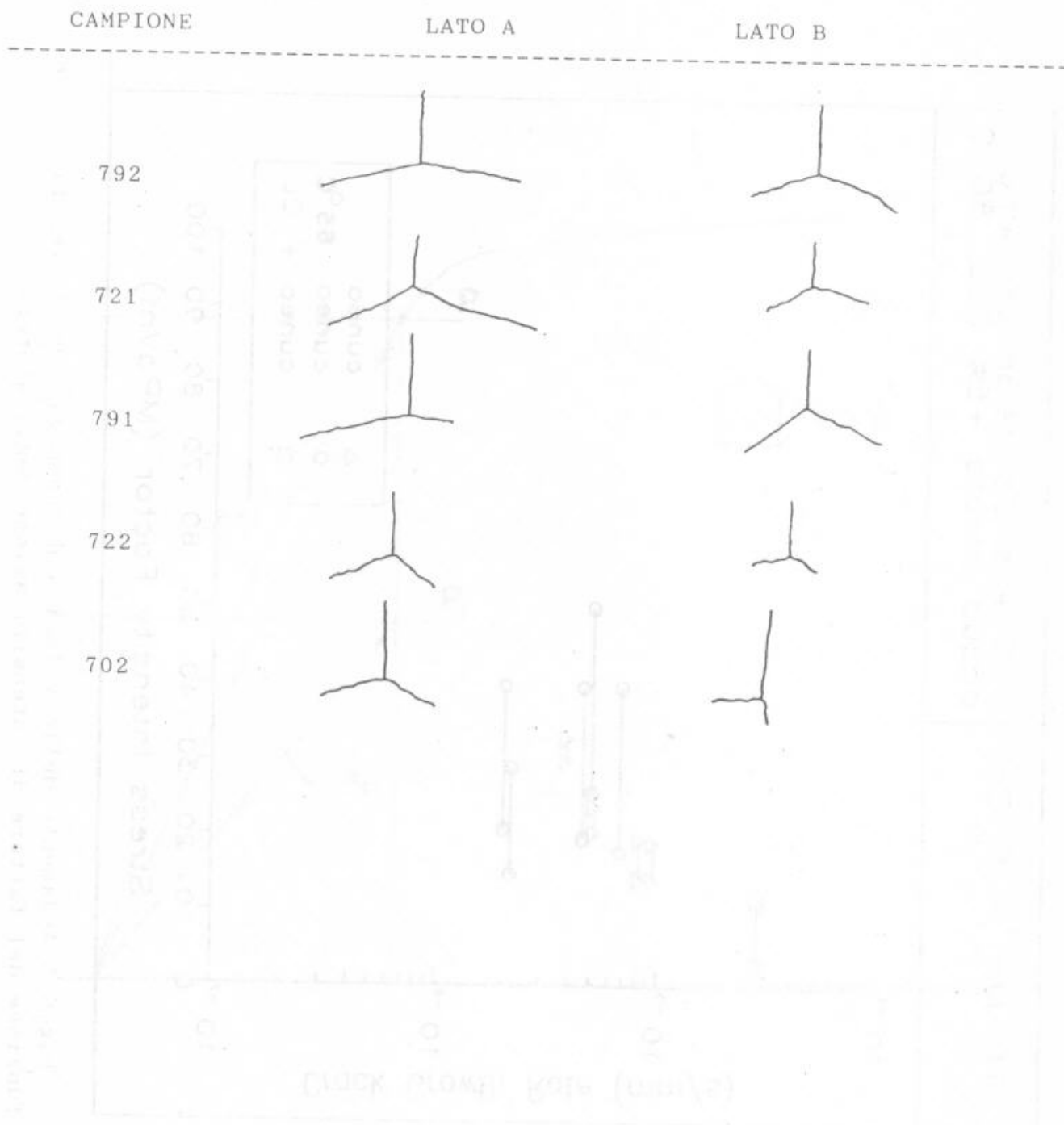


Fig.4 : Andamento del fattore correttivo del K in funzione dell'angolo compreso tra i due rami di cricca. Vedi ref.5.

Fig.5 : Cricche di tensocorrosione sui campioni dopo la prova.



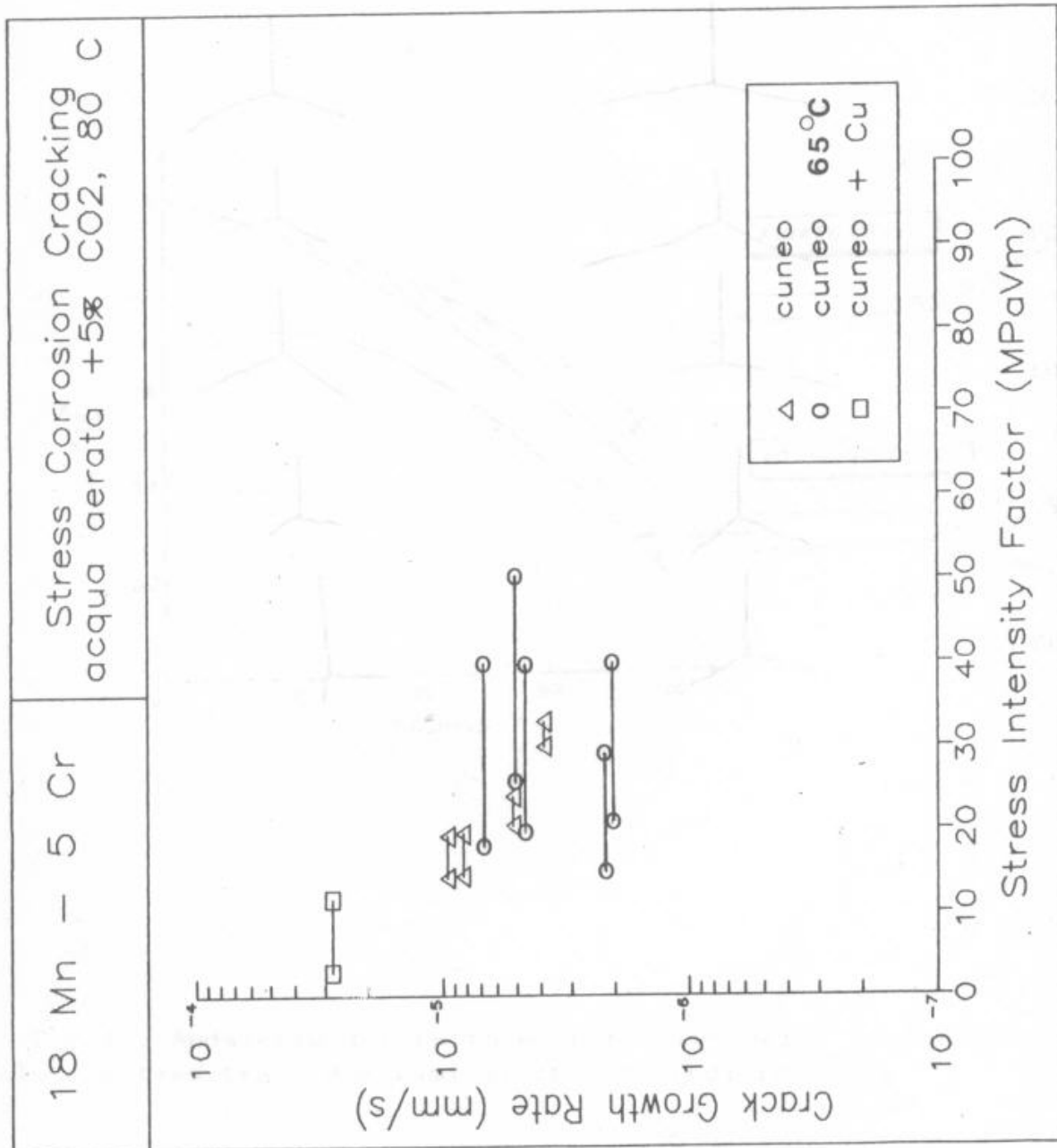


Fig.6 : Andamento delle velocità di propagazione delle cricche in funzione del fattore di intensificazione degli sforzi.



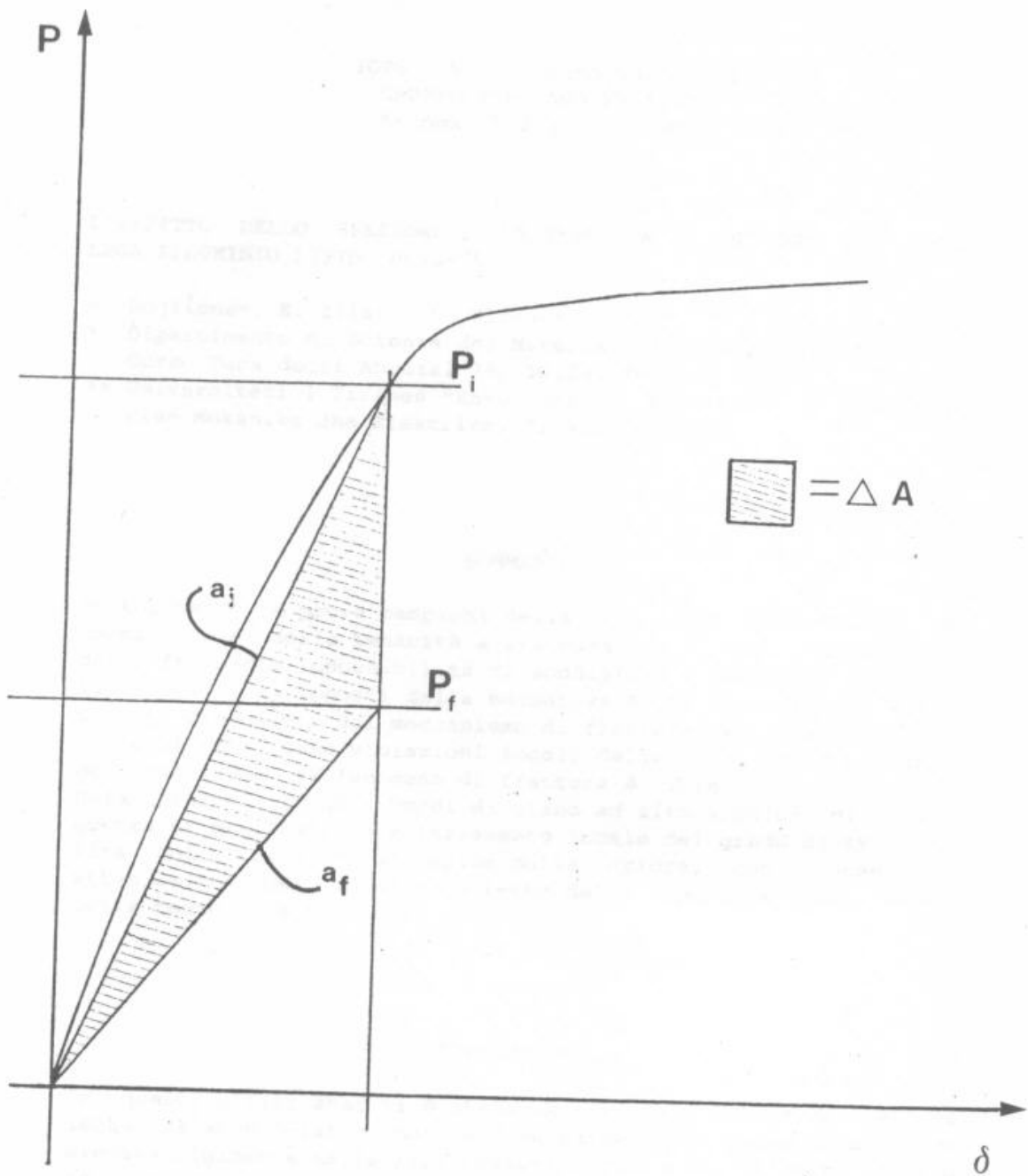


Fig.7 : Rappresentazione schematica della funzione di Griffith