

**SISTEMA DI "POTENTIAL DROP" IN CORRENTE CONTINUA CICLICAMENTE
INVERTITA PER IL MONITORAGGIO DI CRICCHE IN PROVE MECCANICHE**

V. Bicego, C. Fossati, D. Liviero e E. Lucon

CISE SpA, Segrate (Milano)

SOMMARIO - Per il monitoraggio della lunghezza di cricche in prove di laboratorio su campioni metallici, e' stato realizzato al CISE un sistema di Potential Drop in corrente continua ciclicamente invertita, che riunisce gli aspetti piu' favorevoli delle versioni DC e AC della tecnica. La velocita' di campionamento, inversamente proporzionale alla riproducibilita' delle misure, puo' essere impostata dall'operatore in funzione del tipo di prova da eseguire. Le applicazioni del metodo comprendono fatica oligociclica, misure di tenacita' in campo elastoplastico e velocita' di crescita di cricche per creep, fatica e tensocorrosione. Ottimi risultati sono stati conseguiti, utilizzando la massima intensita' di corrente disponibile, anche su leghe di alluminio.

1. INTRODUZIONE

Le attuali linee di sviluppo nel campo della caratterizzazione meccanica dei materiali e in particolar modo della resistenza a frattura intesa in senso lato (tenacita' ad alta e bassa temperatura, propagazione di cricche in regime di fatica elastica o elastoplastica, per scorrimento a caldo, per corrosione....) sono focalizzate essenzialmente su due classi di problematiche entrambe legate al problema piu' generale della valutazione dei reali margini di esercibilita' di un componente: prove ad alta temperatura (sopra i 300-400°C) e prove su piccoli campioni. Le prime sono ovviamente legate all'esercizio ad alta temperatura le seconde al problema della determinazione delle proprieta' meccaniche residue di materiali eserciti. Per poter operare nelle condizioni sopracitate e' pero' necessario disporre di tecniche di misura in grado di garantire, anche in condizioni particolari (quali temperature molto elevate o condizioni ambientali avverse) le precisioni richieste per una corretta valutazione del parametro in esame.

Un secondo aspetto e' rappresentato dalle crescente tendenza ad operare con tecniche monocampione ed in grado di fornire "on line" tutti i dati necessari alla valutazione del risultato finale. L'uso del monocampione e' dettato non tanto dalla necessita' di operare in regime di carenza di materiale, quanto piut-

tosto dal fatto che alcune delle caratterizzazioni in esame tendono ad essere disomogenee nel materiale stesso; poterle misurare direttamente su di un singolo campione permette di separare effetti di dispersione dei dati legati al materiale da altri fattori quali le imprecisioni di misura.

Ultimo requisito sempre piu' considerato e' la possibilita' di disporre di tecniche che consentono una gestione automatizzata della prova con notevoli risparmi di tempo e risorse.

Tra i parametri di cui e' richiesta la misura durante prove di tenacita', velocita' di crescita di cricche a fatica (in campo elastico o elastoplastico), a creep o a corrosione, il piu' delicato e difficile da misurare e' sicuramente la lunghezza della cricca. Possiamo dividere le tecniche disponibili a riguardo in due categorie:

- metodi diretti basati su esami frattografici al termine della prova (osservazione del fronte della cricca);
- metodi indiretti basati sulla misura di parametri in qualche modo correlati alle dimensioni della cricca (segnali di estensimetri, cedevolezza elastica, misure di cadute di potenziale elettrico).

Anche se richiedono tecniche piu' sofisticate, i metodi indiretti offrono maggiori vantaggi:

- le quantita' misurate sono generalmente sotto forma di segnali elettrici facilmente acquisibili in modo automatico, elaborabili e registrabili;
- i dati possono essere acquisiti in continuo anche in condizioni tali da rendere inaccessibile il campione ed utilizzabili metodi ottici;
- il numero di dati acquisiti puo' essere molto elevato senza richiedere tempi di prova per questo piu' lunghi.

Tra i metodi indiretti oggi maggiormente utilizzati dalle procedure monocampione (Key Curve, Unloading Compliance e Potential Drop), il Potential Drop (PD) sembra indubbiamente offrire una notevole serie di vantaggi soprattutto legati alla possibilita' di ottenere una misura della lunghezza di cricca senza dover ricorrere ad estensimetri applicati al campione e quindi soggetti all'ambiente di prova (temperatura compresa) che costituisce spesso un grosso problema per lo sperimentatore.

Il CISE da qualche anno ha iniziato ad utilizzare questo metodo e, al momento attuale, sono stati realizzati 4 diversi sistemi progressivamente piu' sofisticati ed in grado di soddisfare le crescenti esigenze. Nel presente lavoro viene descritta l'ultima versione, caratterizzata da alta efficienza e versatilita'.

2. IL SISTEMA RDCEPD

La metodologia PD fu introdotta al CISE alcuni anni or sono con l'obiettivo primario di ovviare, nel campo della Meccanica della Frattura in regime Elasto-Plastico (EPFM), alle molte limitazioni della tecnica dell'Unloading Compliance (UC). Il risultato fu la messa a punto di un sistema PD adatto alle piu' svariate applicazioni nel campo delle prove meccaniche, configu-

rato in un blocco unico, facilmente trasportabile da un luogo all'altro del laboratorio e in grado di funzionare anche in posizione remota, senza risentire di alcun disturbo elettrico proveniente dall'esterno.

La scelta si oriento' su una versione del metodo in corrente continua (DC), con polarita' di corrente ciclicamente invertita (versione Reversing Direct Current Electrical Potential Drop, RDCEPD), per le ragioni che verranno brevemente esposte nel seguito.

Sebbene le tecniche DC abbiano una sensibilita' intrinsecamente inferiore rispetto alle tecniche in corrente alternata (AC), esse presentano aspetti assai interessanti per l'attivita' di laboratorio:

- non sono richieste apparecchiature sofisticate e particolarmente costose;
- i problemi di rumore elettrico sono di modesta entita' e non occorre particolare attenzione nel collegare il campione al sistema di alimentazione o nel muovere i cavi durante la prova;
- l'intero sistema e' altamente stabile e percio' adatto a prove di lunga durata, anche a temperature elevate.

D'altro canto, le tecniche DC per il monitoraggio della crescita di una cricca presentano alcuni svantaggi:

- per ogni geometria di prova e' necessario disporre di una specifica curva di calibrazione (determinabile o per via teorica, la soluzione di complesse equazioni differenziali, o per via sperimentale);
- il metodo non puo' distinguere tra la crescita della cricca e le variazioni nelle dimensioni del campione che avvengono in condizioni di snervamento generalizzato;
- l'intensita' di corrente da applicare e' sempre piu' elevata di quella necessaria per le tecniche AC;
- i potenziali termoelettrici alle giunzioni tra il campione e i cavi hanno generalmente grande influenza sulle misure.

D'altra parte, nella pratica corrente di laboratorio, tali svantaggi possono essere agevolmente compensati:

- le geometrie di prova previste dalle varie normative, e quindi le relative funzioni di calibrazione, sono in numero limitato;
- variazioni dimensionali del campione dovute a snervamento esteso nel legamento residuo avvengono di solito per campioni con elevato rapporto fra lunghezza della cricca e larghezza del campione ($a/W > 0.8$), eventualita' tutto sommato abbastanza rara nella pratica di laboratorio;
- l'intensita' di corrente normalmente necessaria non e' eccessivamente elevata (il valore massimo da utilizzare per campioni tipo C(T) da un pollice in leghe a base di ferro e' ~ 5 A);
- i potenziali di natura termoelettrica possono essere eliminati dalle misure invertendo periodicamente la polarita' della corrente, e considerando le differenze tra le misure di potenziale eseguite nelle due condizioni di corrente.

La necessita' di evitare gli effetti di natura termoelettrica nelle prove ad alta temperatura e' stata la ragione che ha indotto a sviluppare un sistema PD in versione RDCEPD, simile a quello sviluppato in origine da Coffin e collaboratori alla Gen-

eral Electric 11/. Il diagramma a blocchi del sistema realizzato al CISE e' mostrato in fig.1.

Il sistema e' controllato da un Personal Computer e consiste essenzialmente di tre parti: a) controllo della corrente, b) misura dei potenziali e c) acquisizione ed elaborazione dati.

L'elettronica per il controllo della corrente comprende un alimentatore in corrente continua ed un circuito di inversione.

L'alimentatore puo' fornire una intensita' massima di corrente stabilizzata di 16 Ampere, e presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

regolazione di linea	0.02% + 0.01%
regolazione di carico	0.02% + 0.01%
stabilita'	0.04% + 0.02%
coefficiente di temperatura	0.02% + 0.01% / °C
ripple and noise RMS	600 µA + 50 µA / A
ripple and noise P-P	3 mA + 0.2 ma / A

(Le variazioni tabulate sono espresse come somma di, nell'ordine, una percentuale dell'effettiva corrente di uscita e del range).

Il sistema di inversione della corrente utilizza 4 rele' a stato solido, direttamente controllati (tramite livelli logici 0 ÷ 5 V DC) dal Personal Computer in modo che la velocita' di inversione della corrente possa variare a seconda del numero di campionamenti che si intendono eseguire. Le misure di potenziale sono effettuate dopo un tempo di stabilizzazione pari a 0.2 secondi dopo ogni inversione della corrente. La corrente e' trasmessa al campione per mezzo di cavi di acciaio inossidabile per evitare problemi di corrosione durante prove ad alta temperatura o in ambienti aggressivi.

Il circuito per la misura dei potenziali comprende tre amplificatori isolati caratterizzati da common mode rejection di 165 dB, basso rumore in tensione e non linearita' non superiore allo 0.01%; ognuno di essi opera su uno dei tre segnali di potenziale acquisiti (2 attivi e 1 di riferimento, come descritto successivamente). Cavi di platino schermati (lunghezza 1 m, diametro 0.5 mm) sono impiegati per portare i segnali lontano dalla zona di prova (forno, autoclave ecc.); prolunghe costituite da normali cavi di rame giungono poi agli amplificatori. I segnali vengono successivamente inviati ad un convertitore A/D a 16 bit e 16 canali multiplexati. Viene utilizzato un guadagno complessivo di 1000x, che rappresenta un'amplificazione adeguata dal momento che i segnali originali nel campione sono dell'ordine di 100 µV. Va comunque tenuto presente che questo livello di amplificazione e' da ritenersi adeguato per le prove in aria; in presenza di ambienti corrosivi puo' essere necessario ridurre le tensioni in gioco per evitare disturbi al potenziale elettrochimico e quindi aumentare il guadagno globale.

L'acquisizione dei dati e' controllata dal PC mediante un programma in linguaggio BASIC, che controlla l'inversione della corrente, la velocita' di campionamento ed il numero di letture (da mediarsi successivamente) per ognuna delle grandezze da acquisire (carico, spostamento, potenziali ecc.). Se per gli altri segnali poche letture per ogni ciclo di corrente sono piu' che sufficienti, nel caso dei segnali di potenziale la velocita' di campionamento, impostabile dall'operatore in funzione

dell'applicazione sperimentale, risulta inversamente proporzionale alla riproducibilità delle misure.

L'elaborazione dei dati è eseguita "on line" dopo ogni serie di misure. Per ovviare ai già citati problemi legati ai potenziali termoelettrici e alle fluttuazioni di temperatura e di corrente, i valori di potenziale misurati in corrispondenza dei due semicicli opposti della corrente vengono sottratti e successivamente normalizzati alla corrispondente differenza tra i potenziali di riferimento; si ottiene perciò il seguente potenziale adimensionale:

$$U_k = \frac{M(U)_{k1}^+ - M(U)_{k1}^- + M(U)_{k2}^+ - M(U)_{k2}^-}{M(U)_{kr}^+ - M(U)_{kr}^-} \quad (1)$$

dove, facendo riferimento alla fig.2:

- + e - indicano le opposte polarità della corrente;
- 1, 2 e r indicano rispettivamente i potenziali attivi ed il potenziale di riferimento;
- M è l'operatore di media aritmetica;
- k è un indice che identifica il generico (k-esimo) ciclo di corrente.

Dal valore di U_k , il valore corrente della lunghezza della cricca viene successivamente calcolato utilizzando la funzione di calibrazione relativa alla geometria di prova. I dati grezzi (carico, spostamento del punto di applicazione del carico, numero di cicli, tempo trascorso, lunghezza di cricca, ecc.), misurati ad istanti k successivi nel corso della prova, vengono immagazzinati nella memoria di massa del PC, dalla quale vengono poi trasferiti via interfaccia RS232 ad altri calcolatori più potenti, sui quali si eseguono le elaborazioni definitive (J-R curves, curve da/dN o da/dt, ecc.).

Nella fig.3 sono chiaramente visibili le posizioni delle sonde per la misura dei potenziali attivi su un campione tipo Compact-Tension (C(T)); il posizionamento delle sonde sulla faccia frontale del campione aumenta la riproducibilità delle misure, mentre il posizionamento in prossimità dell'apice della cricca migliora la sensibilità [2]. La configurazione adottata al CISE, e raffigurata in fig.3, rappresenta dunque una soluzione di compromesso. Per ciò che concerne le sonde per la misura del potenziale di riferimento, esse andrebbero posizionate in una regione caratterizzata da un campo di potenziale uniforme, in cui il valore di U resta rigorosamente costante all'avanzare della cricca. Una simile regione risulta estremamente piccola su un campione C(T) e fornirebbe un segnale troppo basso rispetto ai potenziali attivi, con problemi di propagazione degli errori nell'eq.(1). Si è così deciso di rilevare il potenziale di riferimento su un campione "dummy", dello stesso materiale, posizionato nella zona di prova, senza carico e in serie elettrica con il campione di prova; i risultati ottenuti sino ad ora, soprattutto nel campo della meccanica della frattura e della

fatica, testimoniano della bontà della configurazione scelta, in relazione alla precisione richiesta.

3. CALIBRAZIONE DEL METODO

La relazione fra potenziale misurato (U) e lunghezza della cricca (a) può essere espressa nel modo seguente:

$$U = I \cdot f(a, P, T, \text{materiale}, t, \text{configurazione elettrica}) \quad (2)$$

con:

- I = intensità della corrente,
- P = carico applicato,
- T = temperatura,
- t = tempo

(a e P variabili durante la prova, I e T di regola fissati).

La relazione (2) può essere semplificata notevolmente, tenendo innanzitutto conto che, in condizioni prevalentemente elastiche del campione ed in assenza di fenomeni di creep, la dipendenza della resistività del campione dalla temperatura e dal tempo nella (2) possono essere isolate sotto forma di fattore moltiplicativo:

$$U = I \cdot \rho_{\text{mat}}(T, t) \cdot g(a, \text{configurazione elettrica}) \quad (3)$$

D'altro canto, nella maggior parte delle prove di creep, corrosione, fatica e tenacità statica almeno un valore di lunghezza di cricca, $a = a_0$, viene misurato direttamente sul campione al termine della prova; normalmente si tratta del valore iniziale, ma possono venire considerati anche il valore finale o addirittura valori intermedi. La formula di calibrazione del metodo può allora essere espressa in forma adimensionale, indipendente da intensità di corrente, resistività del materiale e temperatura:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{g(a, \text{configurazione elettrica})}{g(a_0, \text{configurazione elettrica})} \quad (4)$$

Va sottolineato che nella (4) si è fatta l'ipotesi, realistica per il sistema RDCEPD, di temperatura e intensità di corrente costanti negli istanti in cui i potenziali U e U_0 sono misurati.

L'eq.(4) dipende dalla geometria del campione di prova, e un punto di partenza per la sua esplicitazione può essere l'analisi bidimensionale compiuta da Johnson /3/ relativamente ad una lastra piana infinita contenente una cricca al centro, con la corrente proveniente dall'infinito; la formula proposta da Johnson è la seguente:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{J(a/W)}{J(a_0/W)} \quad (5)$$

con:

$$J(a/W) = \cosh^{-1} \left\{ \left[\cosh(\pi y/2W) / \cos(\pi a/2W) \right] \right\} \quad (6)$$

Le eqq.(5) e (6) vengono attualmente utilizzate al CISE nell'applicazione del PD a campioni tipo M(T), una geometria non molto lontana da quella idealizzata considerata da Johnson, e su tubi con cricche circonferenziali; per campioni tipo C(T), l'applicazione del modello di Johnson porta ad una sovrastima della lunghezza della cricca /4/, che dagli autori e' stata valutata nell'ordine del 5% dell'effettiva cricca finale, per valori di a/W compresi tra 0.4 e 0.7.

Si e' allora fatto ricorso ad una procedura sperimentale che consente di derivare le opportune formule di calibrazione del metodo PD per le geometrie di prova correntemente utilizzate. Sono state condotte prove di propagazione della cricca per fatica con valori di $R = P_{min}/P_{max}$ variabili nel corso della prova, in modo da ottenere striature visibili ("beach marks") sulle superfici di frattura, per tre delle geometrie considerate dalla normativa ASTM E399: C(T) plain-sided, C(T) con 20% side-grooves e Disk-Shaped (DC(T)) plain-sided. La curva di calibrazione e' stata scelta nella forma di prodotto della funzione di Johnson per un fattore correttivo polinomiale, di valore prossimo all'unita' per la configurazione elettrica mostrata in fig.3:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{J(a/W)}{J(a_0/W)} \cdot \frac{1 + A a/W + B (a/W)^2 + C (a/W)^3}{1 + A a_0/W + B (a_0/W)^2 + C (a_0/W)^3} \quad (7)$$

dove i coefficienti A, B e C sono stati empiricamente determinati in base alle prove di calibrazione sopra citate.

L'eq.(7), con gli opportuni coefficienti, risulta valida per la geometria considerata indipendentemente dalle dimensioni del campione, dal materiale o dalla temperatura; essa e' inoltre numericamente invertibile mediante un algoritmo di tipo iterativo, che converge al valore desiderato in un ampio intervallo di a/W (da 0.3 a 0.8) dopo soltanto due o tre iterazioni. Il motivo di cio' e' l'esistenza di un'espressione analitica esplicita per l'inversione del potenziale di Johnson: l'iterazione e' quindi limitata al fattore correttivo, che rappresenta solamente una perturbazione minore (dato il suo valore prossimo all'unita').

Per verificare l'accuratezza della funzione di calibrazione si opera normalmente il confronto tra il valore predetto ed il valore misurato della lunghezza finale della cricca; la discrepanza, nel caso di prove di creep, corrosione e fatica deve essere non superiore a 0.1 mm. Una piu' efficace corrispondenza tra valori predetti e valori misurati puo' essere ottenuta forzando empiricamente la calibrazione anche sul punto finale della prova.

4. APPLICAZIONI

Prove di fatica, creep e corrosione

Si tratta di prove che impiegano campioni contenenti grandi cricche (profondita' tipica > 10 mm), per il cui monitoraggio la risoluzione e accuratezza fornite dal sistema RDCEPD e' generalmente sovrabbondante rispetto alle necessita'.

Nel caso delle prove di Creep Crack Growth (CCG) il sistema compie acquisizione periodiche, cioe' fornisce valori di lunghezza di cricca a intervalli di tempo fissati da un orologio interno al PC. Come per qualunque altra tecnica, e' ovviamente sempre necessario che la cricca non si propaghi apprezzabilmente durante il tempo che il sistema RDCEPD impiega per rilevare la singola misura. D'altra parte il fenomeno CCG e' intrinsecamente lentissimo, e dunque risulta possibile dedicare un tempo anche molto lungo per la misura della cricca. Tipicamente tale tempo e' dell'ordine di alcuni minuti: la misura di lunghezza risulta da una media di centinaia di campionamenti singoli, a tutto vantaggio della precisione sulla misura (vengono cosi' eliminati i disturbi a media nulla).

In prove di Stress Corrosion (SC) una complicazione e' spesso data dal fatto che un'elevata intensita' di corrente per un lungo tempo di misura altera il potenziale elettrochimico all'apice della cricca e quindi interferisce col fenomeno SC in studio. Come precedentemente osservato, una soluzione e' quella di utilizzare una bassa intensita' di corrente e amplificatori di segnale piu' potenti. E' stata utilizzata con successo un'altra soluzione, consistente nel condurre le prove lasciando i campioni privi di corrente per tutto il tempo, ad eccezione di brevi istanti (mezzo minuto o meno) durante i quali il sistema RDCEPD interviene ad eseguire misure.

Nel caso di prove di Fatigue Crack Growth (FCG) vi e' una possibile complicazione in piu': alle tipiche frequenze di queste prove (> 1 Hz) il carico continua a variare un gran numero di volte durante il tempo (diversi secondi) di una singola misura di cricca, e vi puo' essere un errore nella lunghezza stimata della cricca dovuto a un effetto di "crack closure" elettrico. L'effetto puo' essere evitato intervenendo a fermare (manualmente o, nel caso di prove controllate da un calcolatore come nella fatica random, in modo automatico a istanti prestabiliti) il ciclo meccanico lasciando il provino soggetto a un carico costante (tale da assicurare condizione di cricca totalmente aperta) per tutto il tempo richiesto dalla misura. In pratica, tuttavia, nelle normali prove eseguite su acciai il problema del possibile errore del closure elettrico sulla correttezza della stima di a/W e' irrilevante per tre ragioni:

- il contatto elettrico durante il closure non e' cosi' efficiente se paragonato alla conduzione nel materiale "sound" del legamento, (quando addirittura non vi e' ossido isolante, come in prove ad alta temperatura),
- cio' che conta non e' il valore del closure massimo (p. es. $K_{opening}/K_{max} = 0.5$ per $R\text{-ratio} = 0$) ma il suo valore medio temporale, che e' molto piu' piccolo,

- per come sono strutturate le formule di calibrazione, del tipo dell'eq.(4), e' possibile dimostrare che non vi puo' essere alcun errore nella stima di a per un valore costante di closure durante la prova, mentre un errore e' possibile solo se il closure varia (si noti che nella grande generalita' le prove sono condotte a R costante).

Tutte le verifiche finora eseguite per valutare tale possibile fonte di errore in prove FCG con campionamento RDCEPD scorrelato con la forma d'onda di carico hanno sempre dimostrato che il ruolo del closure elettrico e' irrilevante, almeno nel caso di prove con R positivo su acciai. In tutti questi casi il sistema RDCEPD puo' campionare a intervalli di tempo fissi (p. es. ogni 15 minuti), in modo indipendente dalla storia di carico. Tipicamente il tempo di una singola misura di cricca e' 1/2 minuto. La fig.4 e' un esempio della capacita' del metodo di fornire dati di crescita ripetitivi e accurati anche nel caso di provini piccoli (viene riportato il confronto fra dati ottenuti col sistema RDCEPD su campioni miniaturizzati del tipo Disk Shaped, con diametro 16 mm, e dati di osservazioni visive alle facce laterali di campioni CT con $B=25$ mm).

Fatica random

Il campo tipico di prove che utilizzano cicli di sollecitazione ad ampiezza non costante (variabile in maniera fissata o anche in modo stocastico secondo certe distribuzioni probabilistiche) e' quello dei materiali per l'industria aeronautica e automobilistica. Le prove sono condotte su macchine servocontrollate gestite da calcolatore. La presenza del calcolatore per la realizzazione delle storie di carico randomizzate e' di grande utilita' anche per l'uso combinato del sistema RDCEPD: il calcolatore che pilota la macchina puo' essere impostato in modo da interrompere il ciclaggio meccanico a certi istanti, porre in lieve trazione il campione quanto basta per aprire completamente la cricca, dare il consenso per la acquisizione di una misura di lunghezza da parte del sistema RDCEPD, dedicando a tale operazione tutto il tempo che serve, e quindi, ad acquisizione terminata, riprendere la fatica meccanica.

Con tale metodo si sono riusciti ad ottenere dei buoni risultati anche in prove su campioni di alluminio con geometria M(T), che a priori avrebbero potuto costituire un problema per il sistema CISE. Infatti non va dimenticato che esso e' stato dimensionato per una intensita' massima di corrente erogata di 16 A, valore adeguato per la gran parte delle applicazioni su campioni C(T) da un pollice di leghe ferrose. Nel caso di pannelli di alluminio la sezione trasversale percorsa dalla corrente e' generalmente superiore, ma soprattutto la resistivita' elettrica dell'alluminio e' di un'ordine di grandezza inferiore a quella del ferro, e cio' ovviamente deprime i valori dei potenziali. Nonostante tali controindicazioni, la sofisticazione della procedura di misura e dell'apparato strumentale RDCEPD ha, come detto, dato buona prova anche per situazioni al di la' dei limiti (e degli scopi) di impiego in origine fissati, si veda la fig.5.

Innesco di cricche in regime LCF

Il sistema è stato impiegato in prove di fatica in campo elastoplastico nelle quali interessa individuare il primo istante del formarsi di una piccola cricca, su provini non pre-intagliati. L'interesse per tale tipo di analisi riguarda:

- lo studio dell'influenza di fattori di concentrazione di sforzo sulla vita all'innesco (effetto K_t , applicabilità della correlazione di Neuber per la previsione dell'effetto d'intagli) e
- la comprensione del diverso ruolo dell'innesco e della propagazione nel determinare la durata complessiva di campioni di classiche prove LCF di laboratorio.

In prove a temperatura ambiente di questo tipo buoni risultati erano stati in realtà ottenuti sia utilizzando la tecnica RDCEPD sia utilizzando la tecnica UC: entrambe apprezzano cricche a partire da una profondità di 0.1 mm. Ad alta temperatura solo la tecnica RDCEPD è invece adeguata. Una situazione ancor più favorevole si ha quando è presente un Hold Time, potendosi dedicare tutto il tempo dell'Hold Time per la misura del potenziale, a tutto vantaggio della stabilità delle misure: si veda la fig.6.

In queste prove, nelle quali la durata del ciclo di fatica è tipicamente maggiore rispetto ai tipici tempi di campionamento RDCEPD, è sempre importante che il campionamento sia sincronizzato col ciclo meccanico. Questo non tanto per poter eseguire le misure in fase tensile ed eliminare il problema del crack closure elettrico, quanto soprattutto perché il valore della caduta di potenziale dipende dal valore del carico presente sul campione durante la fase di campionamento, tramite l'incremento di resistività elettrica del materiale dovuto alla plasticizzazione (effetti di magneto-strizione, talora indicati in letteratura, non sono invece mai stati riscontrati nell'esperienza finora maturata al CISE in prove col sistema RDCEPD su acciai bassoalegati).

Gli aspetti relativi allo studio dell'innesco di piccole cricche su campioni di acciaio bassoalegato formano oggetto di una memoria specifica su tali temi, presentata in questo stesso convegno /5/, alla quale si rimanda per ulteriori commenti.

Propagazione di piccole cricche

La disponibilità di dati FCG specifici per il comportamento delle piccole cricche (che come è noto è anomalo rispetto al comportamento di grandi cricche tipiche degli studi LEFM) su campioni di materiale vergine o pre-esercitato a creep è di rilevante importanza per la valutazione dell'aspettativa di vita di componenti che operano in situazioni in cui tali cricche sono presenti.

A questo scopo presso il CISE è in corso un'attività rivolta alla messa a punto di una metodologia di prova in grado di monitorare la crescita di cricche a partire da una profondità di 0.1 mm durante prove di fatica ad alta temperatura. Trattandosi di cricche piccole, questioni quali sensibilità e accuratezza della tecnica di misura sono di vitale importanza, e l'impiego del sistema RDCEPD costituisce dunque il nucleo centrale. Anche su tale applicazione viene data una descrizione approfondita nella già citata memoria al Convegno.

Tenacita' a frattura

L'impiego del sistema RDCEPD per misure di lunghezza di cricche durante prove di tenacita' a frattura in campo elasto-plastico consente, come detto, di ottenere curve di resistenza alla frattura (J-R curve) con procedura mono-campione; in questo senso la tecnica e' alternativa ai metodi della "Key Curve" e della cedevolezza, rispetto ai quali offre maggiore accuratezza e piu' vasto campo di impiego (piccoli campioni, prove in temperatura). Una volta che si disponga delle appropriate relazioni di calibrazione, gli unici problemi legati all'impiego della tecnica RDCEPD possono essere legati al tempo di prova ed al ruolo della plasticita'.

Considerazioni di tipo teorico per l'esistenza sui provini dei campi di sforzo e sollecitazione J-dominati (campo cosiddetto HRR, Hutchinson-Rice-Rosengreen) impongono restrizioni sulla minima dimensione dei campioni (e questo non e' certo un problema per l'impiego del sistema RDCEPD) e, nel caso di prove in temperatura, anche sulla minima velocita' di applicazione del carico (dopo un certo tempo i fenomeni di rilassamento comportano l'estinzione del campo HRR, e la formazione di campi dominati dai parametri del creep, C_t e C^*). In assenza di una precisa normativa su quest'ultimo punto, e' sempre opportuno eseguire le prove in temperatura adottando il minimo tempo previsto da ASTM E813: indicativamente, per campioni di acciaio a 500°C si adotta un tempo di circa 1/2 minuto. Il sistema RDCEPD, utilizzato alla massima velocita' di campionamento, fornisce in tal caso una trentina di misure di lunghezza della cricca. Ovviamente le operazioni di media su campionamenti multipli sono in tal caso ridotte al minimo, ma anche cosi' la dispersione e' contenuta entro limiti accettabilissimi: si veda la fig.7.

L'aumento del potenziale elettrico in un campione attraversato da corrente costante in una prova di J e' dato, oltre che dall'avanzamento del difetto, anche dall'aumento della resistivita' elettrica del materiale dovuto alla crescente plasticizzazione del legamento. Solo il primo contributo va tenuto in conto per la valutazione della profondita' della cricca mediante le consuete formule di calibrazione (eq.(7)), e dunque per operare la suddivisione fra potenziale dovuto a propagazione e potenziale dovuto a plasticizzazione occorre fare ricorso a modelli particolari. In teoria e' sempre possibile pensare a modelli rigorosi, in grado di sommare i contributi di resistivita' locale delle varie regioni del campione sollecitate. Il risultato di tale impostazione pero', oltre a richiedere misure ed analisi preliminari per fissare i parametri numerici, e' necessariamente specifico della particolare situazione indagata: tipo di materiale, temperatura e forma di campione. E' dunque grandemente preferibile il ricorso a modelli fenomenologici, che siano semplici, di validita' generale e basati su dati gia' disponibili dalle prove di J (carichi, spostamenti e potenziali elettrici), senza necessita' di misure aggiuntive.

La letteratura offre due di tali modelli per la trattazione della plasticita' in prove di J strumentate col PD, entrambi legati unicamente a una ridefinizione del potenziale iniziale U_0 : ad ogni istante della prova U_0 rappresenta il valore di potenziale che compete al campione deformato in campo elasto-plastico al carico P , nell'ipotesi di cricca non propagata ($a=a_0$). Un primo metodo, proposto in ambito europeo, considera valori di U_0

crescenti linearmente col carico applicato durante il tearing, fig.8a. Un secondo metodo, diffuso negli USA, utilizza un valore costante di U_0 individuato in corrispondenza del punto angoloso di un diagramma $U-\delta$, fig.8b. In ogni caso si tratta di modelli empirici, la cui bontà va valutata in termini di confronto fra lunghezze finali di cricche predette e risultati di effettive misure sui campioni rotti. Analisi di questo tipo effettuate al CISE su un certo numero di acciai hanno indicato che:

- la correzione dei potenziali elettrici per tener conto degli effetti della plasticità è sempre necessaria;
- in molti casi nei quali il ruolo della plasticità è contenuto (incremento di potenziale per effetti plastici molto inferiore all'incremento dovuto a crescita di cricca) risultati soddisfacenti si ottengono con entrambi i metodi;
- quando la correzione è elevata il metodo americano produce stime sensibilmente migliori;
- talora il metodo americano è però mal applicabile perché il ginocchio nella curva $U-\delta$ non è ben definito.

5. CONCLUSIONI

Un sistema RDCEPD, derivato da un analogo sistema GE, è stato sviluppato al CISE per misure di lunghezza di cricca in diversi tipi di prove di laboratorio: fatica oligociclica, fatica, crescita di cricche per corrosione o scorrimento a caldo, meccanica della frattura elastoplastica. Il sistema consente compensazioni automatiche per fluttuazione di corrente o temperatura e per i potenziali di giunzione. La strumentazione è montata su di un supporto mobile che permette facili movimenti all'interno del laboratorio per posizionarsi in prossimità delle stazioni di prova. L'hardware è unico, indipendentemente dal tipo di prova; solo leggeri adattamenti, in funzione del tipo di prova, sono richiesti al software di acquisizione ed elaborazione dei dati. Il costo totale della strumentazione, incluso il PC, è stato di circa 15ML.

Come per tutti i sistemi basati sul metodo del Potential Drop, sono richieste calibrazioni specifiche per i vari tipi di geometria di campione utilizzata. Le calibrazioni devono essere particolarmente accurate e richiedono un certo impegno preliminare da parte dello sperimentatore. Tuttavia, grazie alla loro indipendenza del tipo di materiale e dalla temperatura, è necessario ripetere la calibrazione solo nel caso di nuove geometrie.

La precisione dei dati ottenuti è risultata molto buona specie nel caso di prove in campo elastico. Anche la sensibilità è risultata molto buona come indicano i risultati ottenuti su pannelli in lega di alluminio ove, a causa dell'alta conducibilità del materiale, i potenziali in gioco erano molto piccoli.

Nel caso di prove in campo elastoplastico, quali ad esempio quelle per la determinazione di J-integral, esiste il problema, non imputabile alla strumentazione, di separare l'effetto della crescita della cricca da quello del cambio di resistività dovuto

alla plastificazione del materiale. Per le prove su campioni C(T) sono stati considerati due tipi di approccio di tipo fenomenologico e basati su di una ridefinizione del potenziale iniziale U_0 . Sulla base dell'esperienza acquisita si puo' affermare che, nel caso di materiali per cui la zona plastica sia rilevante, migliori risultati si ottengono considerando U_0 costante durante la propagazione. Nel caso di materiali che presentino zone plastiche di entita' ridotta entrambi i metodi danno risultati soddisfacenti.

Il sistema RDCEPD puo' infine essere utilizzato per misure dirette su componenti, potendo essere utilizzato anche a distanza dall'impianto. Utilizzando piu' sonde e' inoltre possibile ottenere informazioni anche sulla geometria della cricca.

BIBLIOGRAFIA

- 11/ Catlin, W.R., Lord, D.C., Prater, T.A. e Coffin, L.F., "The Reversing D-C Electrical Potential Method", in "Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth", ASTM STP 877, 1985, pp.67-85.
- 12/ Wilkoski, G.M., Wambaugh, J.O. e Prabhat, K., "Single Specimen J-R Curve Evaluations Using the DCEPD Method and a Computerized Data Acquisition System", in "Fracture Mechanics: 15th Symposium", ASTM STP 833, 1984, pp.553-576.
- 13/ Johnson, H.H., "Calibrating the Electrical Potential Drop Method for Studying the Slow Crack Growth", in "Materials Research and Standards", Vol.5, N°9, Sep 1965, pp.442-445.
- 14/ Vassilors, M.G. e Hackett, E.M., "J-Integral R-Curve Testing of High Strength Steels Utilizing the DCPD Method", in "Fracture Mechanics: 15th Symposium", ASTM STP 833, 1984, pp.535-552.
- 15/ Bicego, V., Ragazzoni, S., Giamboni, S. e Grisoni, G., "Innesco e Propagazione di Piccole Cricche di Fatica su Acciai Bassolegati", memoria presentata al VI Convegno Nazionale del Gruppo Italiano di Frattura, IGF6, Ancona, 7-8 giugno 1990.

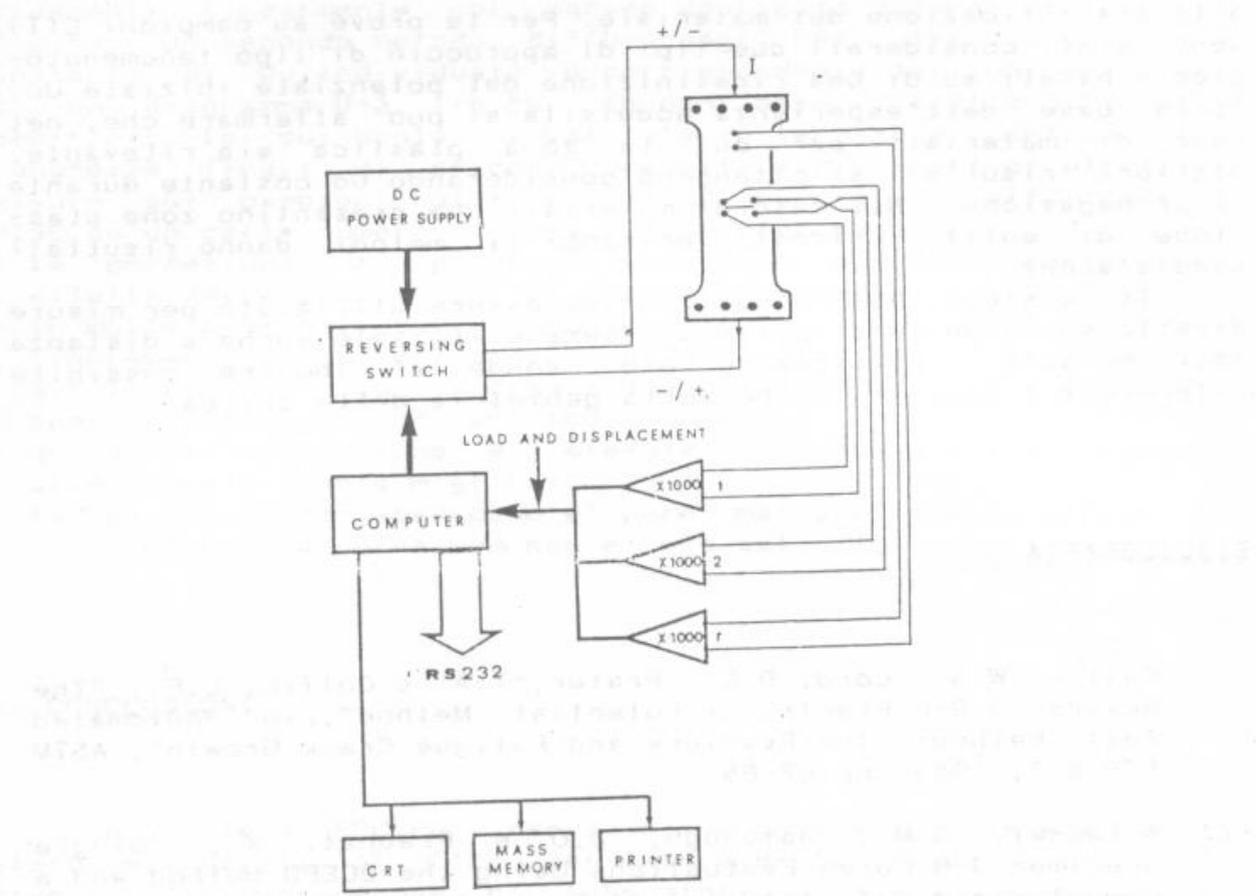


Figura 1. Diagramma a blocchi del sistema RDCEPD realizzato al CISE.

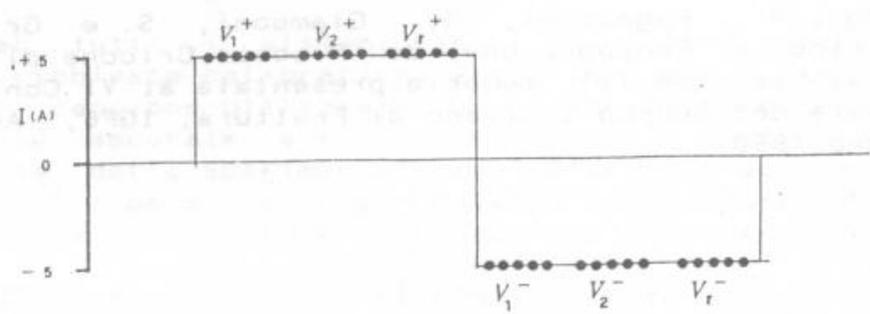


Figura 2. Campionamento dei segnali di potenziale con il sistema RDCEPD.

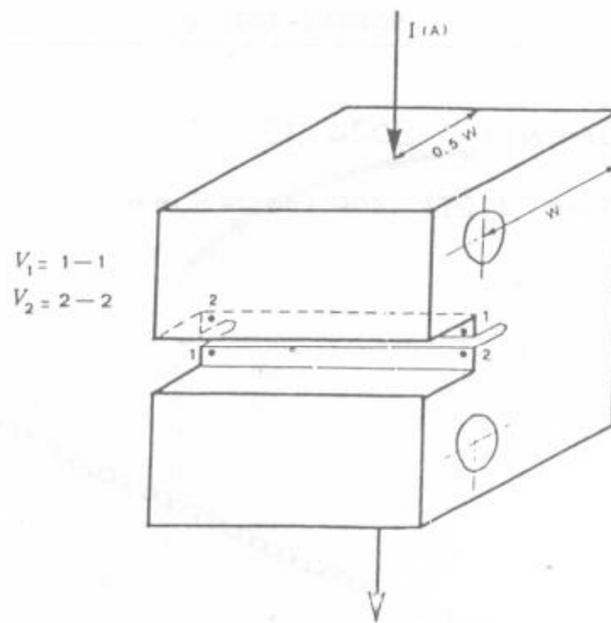


Figura 3. Configurazione delle sonde di corrente applicate ad un campione C(T) per la misura dei potenziali con il sistema RDCEPD.

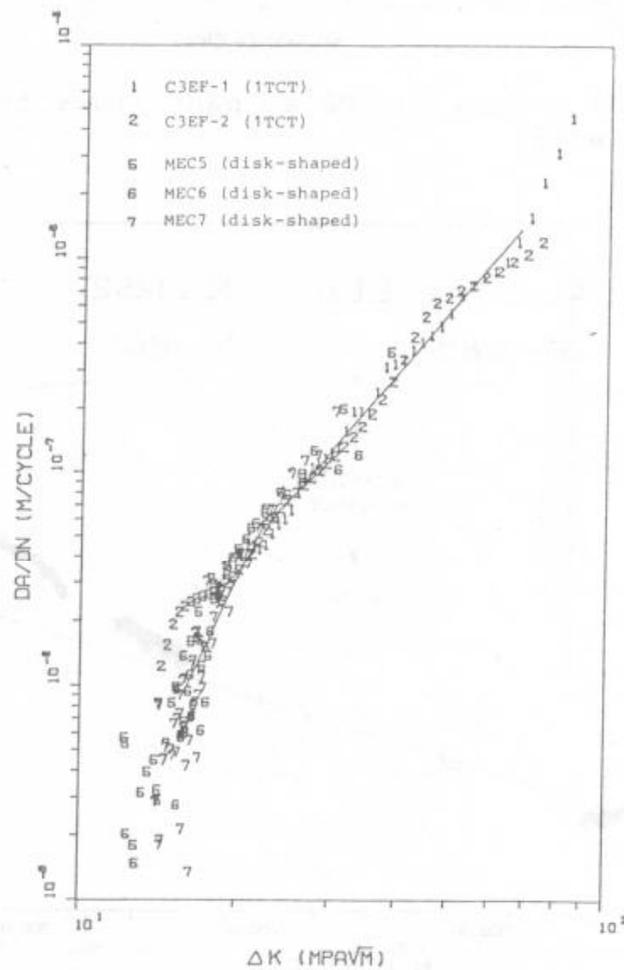


Figura 4. Dati di velocità di crescita di cricca a fatica (da/dN) per minicampioni DS (rilevati con PD) e campioni 1TCT.

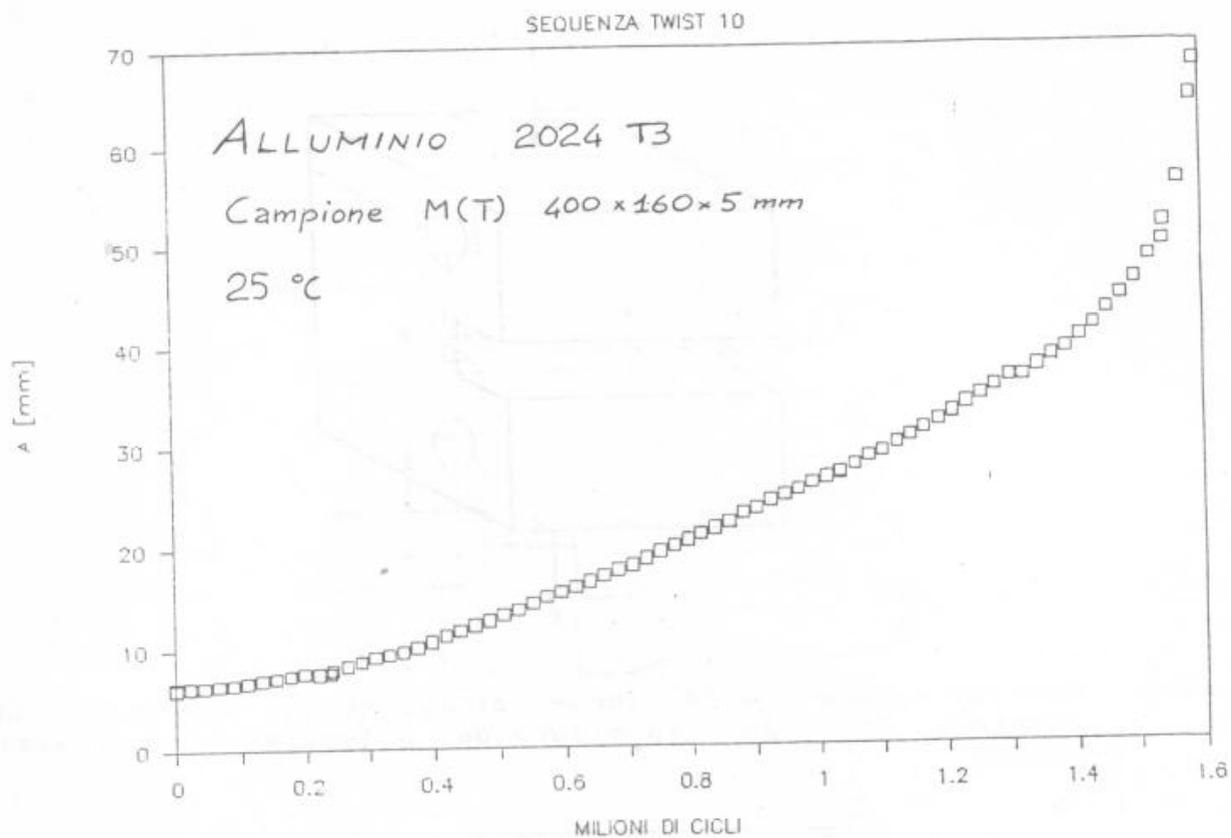


Figura 5. Misura di cricca con PD su pannello sottoposto a sequenza di fatica TWIST.

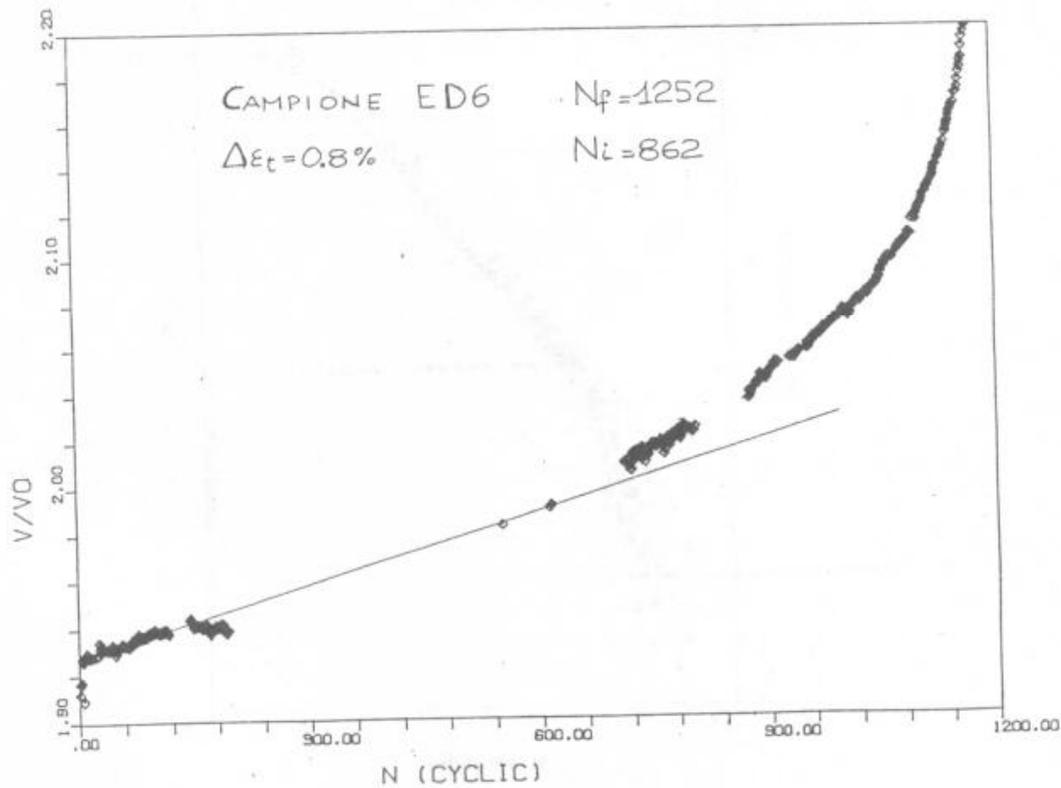


Figura 6. Rilevazione dell'innescio di cricca in una classica prova LCF.

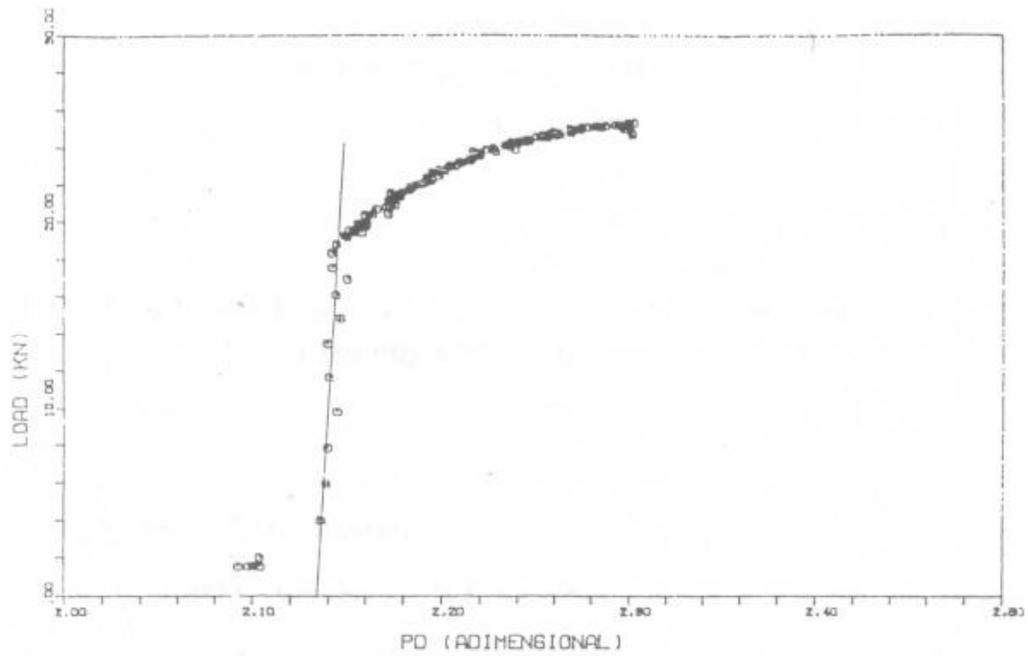


Figura 7. Esempio di grafico carico/potenziale acquisito durante una prova PD che evidenzia la contenuta dispersione dei dati sperimentali.

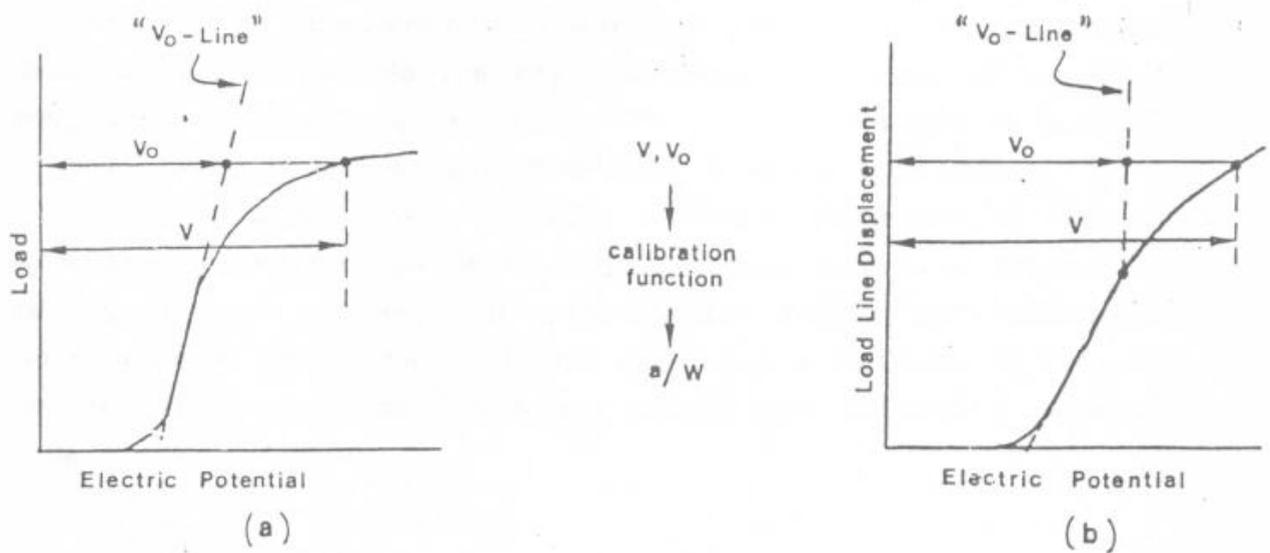


Figura 8. Schema dei due metodi per la determinazione della lunghezza dicricca in una prova EPFM: (a) europeo, (b) americano.