

INNESCO E PROPAGAZIONE DI PICCOLE CRICCHE DI FATICA SU ACCIAI
BASSOLEGATI

V. Bicego(1), S. Ragazzoni(2), S. Giamboni(3) e G. Grisoni(3)

SOMMARIO - Vengono presentate le attivita' sperimentali in corso al CISE relativamente all'analisi di piccole cricche di fatica sugli acciai. Le cricche sono monitorate con un sofisticato sistema di Potential Drop. Si effettuano studi di innesco in regime di fatica oligociclica, per valutare effetti di concentrazioni di sforzo ed effetti tempo-dipendenti indotti dall'Hold Time. Sono effettuate verifiche di modelli di crescita specifici per le piccole cricche. Infine viene descritto lo stato di avanzamento di un'attivita' recentemente avviata e rivolta ad ottenere dati di velocita' di crescita per fatica in temperatura di piccole cricche, su materiale vergine ed anche preventivamente esercito a creep.

1. INTRODUZIONE

Il comportamento a fatica (Fatigue Crack Growth, FCG) di piccole cricche (tipicamente con profondita' $< 1\text{mm}$) negli acciai e' noto essere anomalo rispetto alle leggi, basate sui parametri della Meccanica della Frattura (essenzialmente il fattore ciclico di intensita' di sforzo ΔK , e l'analogia grandezza per il caso elasto-plastico, ΔJ) che sono state proposte per descrivere la propagazione delle grandi cricche. Le anomalie sono riassumibili principalmente in due peculiarita', v. fig.1: (i) velocita' di crescita piu' elevate rispetto alle grandi cricche, a parita' di "driving force" ΔK o ΔJ , e (ii) crescita per fatica anche al di sotto dei valori di soglia ΔK_{th} o ΔJ_{th} tipici delle grandi cricche. A livello ingegneristico, entrambi questi aspetti comportano la non-conservativita' di calcoli di durata a fatica che non tengano nel dovuto conto le anomale caratteristiche di comportamento delle piccole cricche. Le piccole cricche sono percio' oggetto di crescente interesse in ambito scientifico e anche in ambito tecnologico, in quanto molti componenti di impianti si trovano ad operare per una frazione consistente della loro vita in una situazione nella quale le piccole cricche sono presenti e in via di graduale propagazione.

Diversi meccanismi, da cui discendono diversi modelli di propagazione, sono stati proposti per spiegare il particolare comportamento delle piccole cricche. Si usa ormai distinguere due tipologie di piccole cricche:

- le cricche piccole in senso fisico (microstrutturale) che interagiscono con la struttura fine del materiale dando luogo a propagazioni irregolari per velocita' e direzione, e che sono

1 CISE SpA, Segrate (Milano)
2 ENEL/CRTN, Milano
3 CESNEF, Politecnico di Milano

importanti soprattutto nella fatica ad altissimo numero cicli, e

- le cricche piccole in senso meccanico, per le quali vale ancora una descrizione in termini di meccanica del continuo come per le grandi cricche salvo che i campi di sforzo e deformazione all'apice sono alterati; tali piccole cricche sono importanti in situazioni di concentrazioni geometriche dei campi di sforzo, in regime di fatica oligociclica (LCF) e comunque in casi di fatica con sollecitazioni prossime allo snervamento.

Il presente lavoro intende svolgere una panoramica sulle attività sperimentali, di comprensione e "modeling" in corso al CISE relativamente al comportamento meccanico di cricche di fatica piccole nel senso della seconda accezione appena detta. Gran parte del lavoro riguarda problematiche di danneggiamento LCF di un acciaio per rotore di turbina a vapore 1CrMoV, nell'ambito di un più esteso programma ENEL/CRTN rivolto alla caratterizzazione meccanica completa del materiale e alla verifica e messa a punto di metodi di analisi del danno e di previsione di vita. In tale ambito hanno trovato spazio studi sperimentali sulla ripartizione della vita LCF in innesco più propagazione, verifiche di leggi di crescita di piccole cricche in campo elasto-plastico, analisi di effetti d'intaglio sull'innesco di piccole cricche. Nell'ambito di una collaborazione fra il CISE e il Politecnico di Milano per una tesi sperimentale annuale di due laureandi in Ingegneria Nucleare, di recente è poi stata avviata un'attività rivolta allo studio delle modalità di crescita per fatica ad alta temperatura di piccole cricche semiellittiche superficiali in campioni di acciaio 2 1/4 Cr 1 Mo, pre-danneggiati a creep e non, con lo scopo di mettere a punto una metodologia adatta a consentire di derivare realistiche valutazioni di durata di componenti che subiscono danno per fatica in aggiunta al degrado per creep durante i lunghi periodi di funzionamento a regime.

2. INNESCO DI CRICCHE IN REGIME LCF

Nell'ambito dell'attività di studio del comportamento in regime LCF del materiale 1CrMoV, tipo ASTM A470 Cl8, di un rotore di alta-media pressione, sono state effettuate prove su alcuni campioni strumentati con il sistema del Potential Drop di recente messo a punto al CISE. Si tratta di un particolare sistema, in corrente continua con inversione periodica di polarità, (sistema RDCEPD /1/), che grazie alla notevole sensibilità è particolarmente adatto per apprezzare piccole variazioni del potenziale indotte da piccoli difetti superficiali innescati durante le prove di fatica. Il metodo è stato impiegato per attività rivolte ad analizzare due aspetti del danno LCF:

1. il ruolo di fattori geometrici di concentrazioni di sforzo sulla vita all'innesco ("effetto Kt");
2. le diverse entità di fasi di innesco e di propagazione di cricche nel determinare la vita complessiva del materiale.

In fig.2 è mostrato un esempio di risultati di durata all'innesco conseguiti in prove di fatica con ciclo continuo effettuate su campioni intagliati (con geometrie Compact Tension e Center Notched Tension) e diversi valori di Kt, e su campioni lisci di classiche prove LCF, correlati secondo la legge di Neuber:

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta S} = \frac{\Delta E}{\Delta e} = K \frac{2}{t} \quad (1)$$

($\Delta S, \Delta e$ = sforzo e deformazione nominali, $\Delta\sigma, \Delta E$ = sforzo e deformazione effettivi all'apice dell'intaglio). A parte piccole discrepanze sistematiche, attribuibili al diverso stato di sollecitazione 3-D del materiale nei vari campioni (che comunque comprovano la conservatività delle consuete applicazioni ingegneristiche della legge di Neuber), la correlazione appare piuttosto buona. L'utilizzabilità della legge di Neuber anche per correlare dati di resistenza LCF in presenza di un Hold Time (HT) è questione più complessa; per studiare tale aspetto è in corso uno studio congiunto CISE - ENEL/CRTN che combina all'analisi di prove apposite i risultati di calcoli effettuati con metodi elementi finiti.

In fig.3 è mostrata la ripartizione in cicli fino all'innescò (profondità di cricca fino a 0.1 mm) e in cicli di propagazione della vita complessiva N_f rilevata in prove LCF a ciclo continuo e con HT di un'ora, sempre su materiale 1CrMoV. Un esame preciso di tali risultati ha indicato che l'effetto dell'HT è principalmente quello di ridurre i cicli all'innescò (N_i), senza apprezzabilmente influenzare il periodo di propagazione (N_p). Quantitativamente, in prove con ciclo continuo si è rilevato un rapporto medio N_i/N_f pari a 0.84 a temperatura ambiente e a 540°C, e pari a 0.67 nelle prove con HT = 1h a 540°C. L'anticipato innescò di piccole cricche nelle prove con HT sembra legato al ruolo dell'ambiente (innescò favorito da rottura dell'ossido superficiale).

3. MODELLI DI PROPAGAZIONE

Per cricche piccole in senso meccanico, suscettibili di descrizione mediante parametri della meccanica del continuo e per le quali tuttavia l'approccio della LEFM non è praticabile a causa dell'eccessiva estensione della plasticizzazione locale, solo l'impiego di un'analisi di tipo elasto-plastico consente di rendere ragione, almeno in parte, della loro anomalia di comportamento. In quest'ambito i modelli che più si sono affermati in letteratura e nelle applicazioni tecnologiche sono quelli proposti da Miller /2/ e Skelton /3/:

$$da/dN = C1 a + C2 \quad (2)$$

e da Dowling /4/:

$$da/dN = C3 (\Delta J)^{C4} \quad (3)$$

dove $C1, C2, C3$ e $C4$ sono costanti che dipendono dal materiale e dalle caratteristiche del ciclo di fatica, $2a$ è la lunghezza superficiale della cricca e ΔJ il parametro di Rice ciclico.

L'impiego per la legge di crescita delle piccole cricche del fattore ΔJ nella veste di parametro di correlazione, in sostituzione dell'intensità di sforzo elastico ΔK , più solitamente considerato nelle leggi di crescita delle grandi cricche (legge di Paris), è tuttavia stato riconosciuto insufficiente ad ottenere dati di velocità completamente indipendenti dalla lunghezza del difetto /4/. Le principali cause di tale ulteriore di-

screpanza nei dati di velocità di grandi e piccole cricche sono spesso imputate all'intervento di fenomeni di natura localizzata, quali effetti di crack-closure e ambientali, che fanno venir meno il concetto di "similitudine" alla base delle descrizioni delle cricche con i parametri della Meccanica della Frattura /5/.

Per ottenere una migliore correlazione El Haddad et al. /6/ hanno proposto una ridefinizione fenomenologica del ΔJ basata su una lunghezza fittizia ($a + a_0$) della cricca, essendo:

$$a_0 = 1/\pi (\Delta K_{th} / \Delta \sigma_{end})^2 \quad (4)$$

Tale modello è stato verificato con successo al CISE. Esso è stato adottato per descrivere la cinetica di piccole cricche in regime di fatica oligociclica. Si sono analizzati sia dati della caratterizzazione già citata dell'acciaio 1CrMoV, sia dati relativi ad AISI 304 ed IN738 disponibili dalla letteratura. L'integrazione delle leggi di crescita così derivate, con i coefficienti dedotti dalle curve di Paris per grandi cricche in regime LEFM, ha dimostrato ottime capacità di previsione di dati di durata LCF in prove a ciclo continuo: figg.4-6 /7/. Attualmente sono in corso tentativi per estendere il modello al caso di fatica con Hold Time (HT). La ricerca è volta alla definizione di un valido metodo per trattare il contributo dell'HT alla propagazione della cricca in condizioni di deformazione controllata; in particolare l'attenzione si concentra sulla scelta di un adeguato modello di Creep Crack Growth (basato sul parametro C^* o, più probabilmente, Ct) in sostituzione del semplice impiego di una formula fenomenologica FCG parametrizzata in tempo /8/ finora considerata (ancora basata sul parametro ΔK ; nelle verifiche eseguite con tale formula su dati di prove LCF con HT si sono ottenute previsioni di vita sempre conservative, essendo la curva FCG determinata da prove FCG con HT a carico costante, dunque poco rappresentativa di HT in rilassamento come nel caso LCF).

4. PICCOLE CRICCHE: STUDIO SPERIMENTALE

Di recente è stata avviata, nell'ambito di un lavoro di tesi, un'attività di sviluppo di una metodologia sperimentale per lo studio di piccole cricche che si propagano per fatica ad alta temperatura.

Particolare attenzione è stata dedicata alla messa a punto di una procedura per la realizzazione, su tipici provini di laboratorio, di piccoli difetti superficiali piani, fig.7. Per correttezza di modellazione teorica (campo K presente fin dall'inizio) si è mirato a riprodurre piccole cricche iniziali "effettive" (anziché piccoli intagli come spesso effettuato in letteratura), che sono oltretutto ben rappresentative dei difetti reali presenti nei componenti: in particolare cricche superficiali semiellittiche piane. La procedura, messa a punto mediante prove preliminari su un acciaio UNI 38NiCrMo4, consiste nelle seguenti fasi in sequenza:

1. realizzazione di un intaglio semiellittico tramite elettroerosione,
2. innesco di una cricca tramite precricatura,
3. asportazione di materiale che elimini completamente l'intaglio lasciando una cricca di profondità controllabile (piccola).

Sempre sull'acciaio 38NiCrMo4 è stata poi messa a punto la metodologia di misura della velocità di crescita delle piccole cricche durante prove di fatica, anche in temperatura. A tal

scopo si è utilizzato il sistema a caduta di potenziale RDCEPD già menzionato, sul quale sono state introdotte delle piccole modifiche a livello di software relativamente alla modalità di acquisizione dei dati durante le prove e, soprattutto, alla procedura di post-elaborazione. L'esigenza di modellare il comportamento di un difetto semiellittico superficiale "piccolo" ha reso infatti necessaria la realizzazione di un programma di calcolo utilizzando il cosiddetto "Potenziale di Roe-Coffin" /9,10/, cioè l'unica relazione di calibrazione disponibile a tutt'oggi in letteratura per la geometria in studio (si tratta di una calibrazione di tipo analitico, ricavata dai due studiosi della General Electric a partire da una soluzione in forma chiusa dell'equazione di Laplace con opportune condizioni al contorno, che prevede la distribuzione di potenziale elettrico indotta, in un provino percorso da corrente continua, dalla presenza di un difetto semiellittico bi- o tri-dimensionale). Nella relazione di Roe-Coffin il potenziale (V) è espresso come funzione della lunghezza di cricca (a) in modo complicato; il problema che si è dovuto affrontare per calcolare "a" a partire dai valori di V rilevati durante le prove è stato quindi quello dell'inversione della forma funzionale di Roe-Coffin, cosa non eseguibile analiticamente e risultata piuttosto onerosa. Va sottolineato, in ogni caso, che non esistono alternative a questo approccio al problema: le dimensioni e la geometria del difetto non consentono infatti in nessun modo l'impiego di calibrazioni empiriche (cfr. /10/). In più, a complicare il quadro concorre la dipendenza della calibrazione di Roe-Coffin dal fattore di forma a/c , a priori non prefissabile perché legato al modo spontaneo di evolvere del difetto fra la configurazione artificiale iniziale e la configurazione a regime (tendenzialmente $a/c = 1$): fig.8.

In parallelo, per giungere a determinare la curva $da/dN - \Delta K$, particolare cura è stata posta anche nella scelta della formula di calibrazione più appropriata per il calcolo del fattore ciclico di intensificazione degli sforzi ΔK ; ci si è orientati sulle ormai classiche relazioni di Newman e Raju /11/.

La fase di messa a punto della metodologia di prova è stata ultimata. Le prove significative sono previste su acciaio 2 1/4 Cr 1 Mo, a temperatura ambiente e a 500 °C, e riguardano sia materiale vergine che materiale proveniente da prove di creep interrotte a frazioni fissate della vita a creep. L'obiettivo della ricerca è la definizione di una metodologia affidabile per lo studio delle piccole cricche negli acciai, in grado di consentire:

1. l'individuazione del cosiddetto "limite di cricca piccola", cioè della dimensione oltre la quale l'anomalia di comportamento della piccola cricca cessa e tornano ad essere applicabili le leggi di crescita delle grandi cricche,
2. l'ottenimento di dati di velocità di crescita specifici per diverse condizioni di degrado a creep del materiale, importanti per valutazioni di vita residua dei componenti esercitati, e
3. la verifica della applicabilità dei modelli di crescita delle piccole cricche più accreditati in letteratura.

Bibliografia

1. V. Bicego, D. Liviero, C. Fossati, and E. Lucon: J-R curve testing utilising the reversing direct current electrical potential drop method, ASTM STP 1092 1990, in stampa.
2. K.J. Miller: Proc. ECF6 Conf. (edited by Van Elst Bakker), Amsterdam, 15-20 June, 1986, pp. 2149-2167.

3. Skelton: Mat. Sci. Eng., vol. 32, 1978, pp. 211-219.
4. N.E. Dowling: ASTM STP 637, 1977, pp. 97-121.
5. S.Suresh and R.O. Ritchie: Int. Met. Rev., Vol. 29, n°6, 1984, pp. 445 -476.
6. K.N. El Haddad, K. Smith and T.H. Topper: ASME, J. Eng. Mat. Technol., 101, 1979, pp. 42-46.
7. V. Bicego: Engng. Fract. Mech., vol. 32, n°3, 1989, pp. 339-349.
8. V.P. Swaminathan, T.T. Shih and A. Saxena: Engng. Fract. Mech., 16, 1982, pp. 827-836.
9. R.H. Vanstone and T.L. Richardson: ASTM STP 877, 1985, pp. 148-166.
10. R.P. Gangloff: Fat. & Fract. of Engng. Mat. & Struct., vol. 4, n°1, 1981, pp. 15-33.
11. J.C. Newman Jr. and I.S. Raju: ASTM STP 791, 1983, pp. I-238 - I-265.

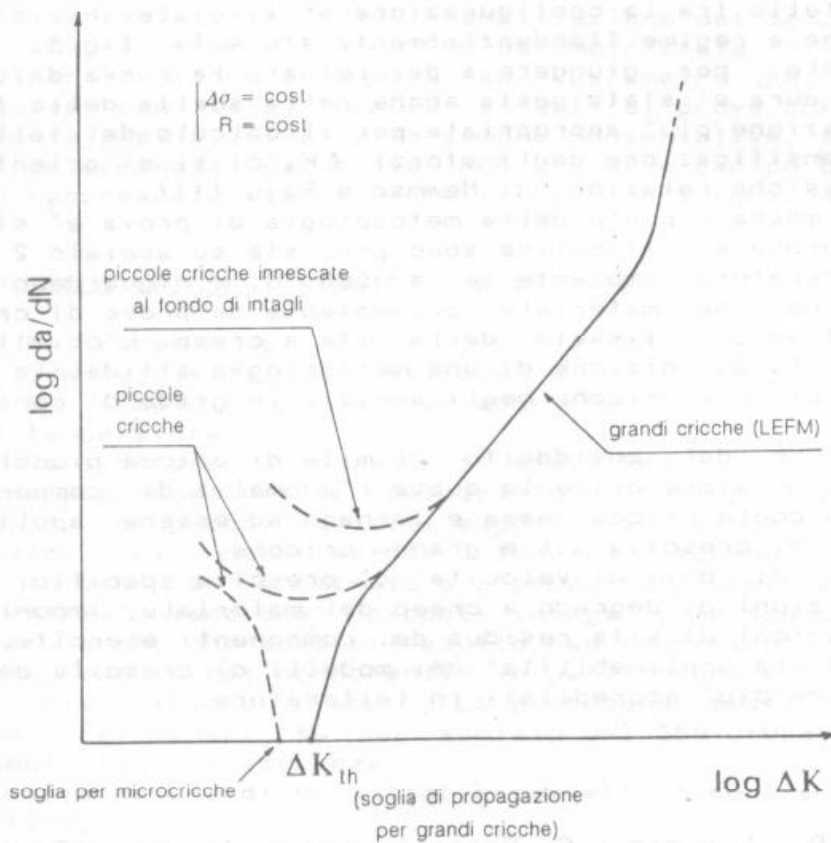


Fig.1 Caratteristiche tipiche di propagazione a fatica di grandi e piccole cricche.

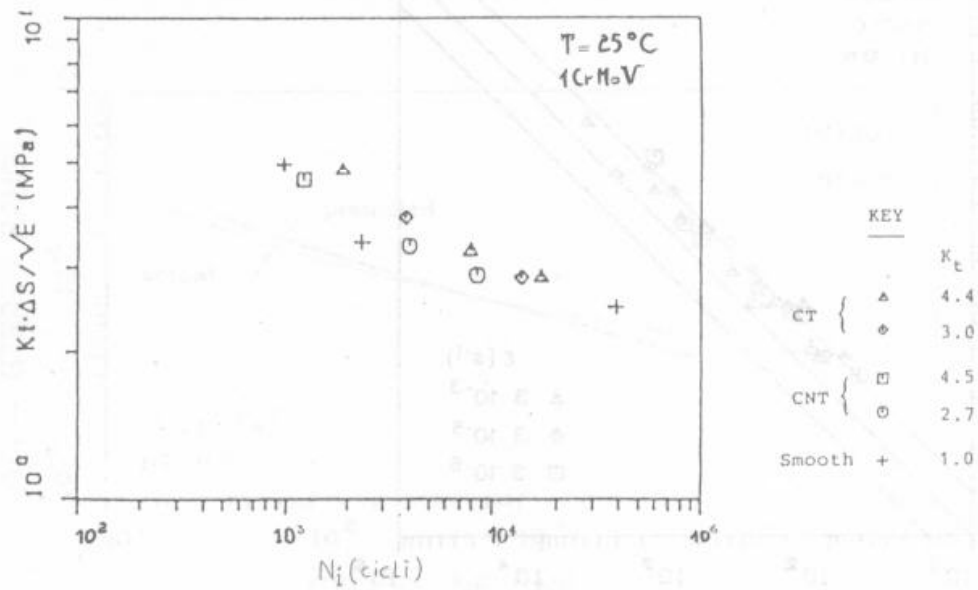


Fig.2 Risultati di durata all'innesco in prove di fatica con ciclo continuo correlati mediante la legge di Neuber.

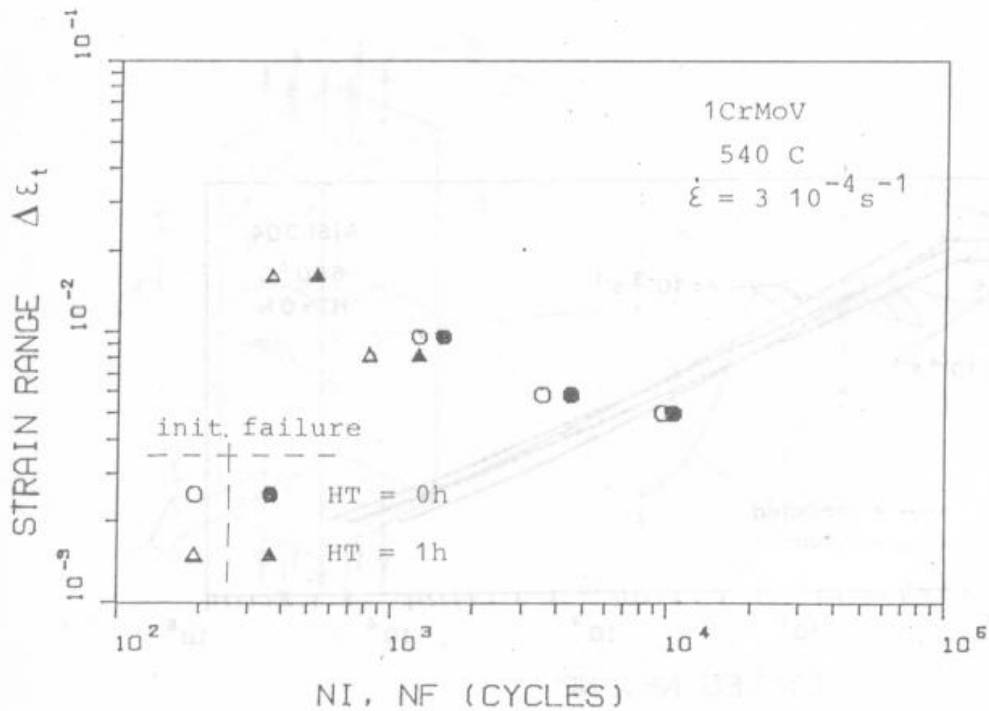


Fig.3 Il ruolo del periodo di innesco sulla durata di normali campioni, in classiche prove LCF, con e senza HT.

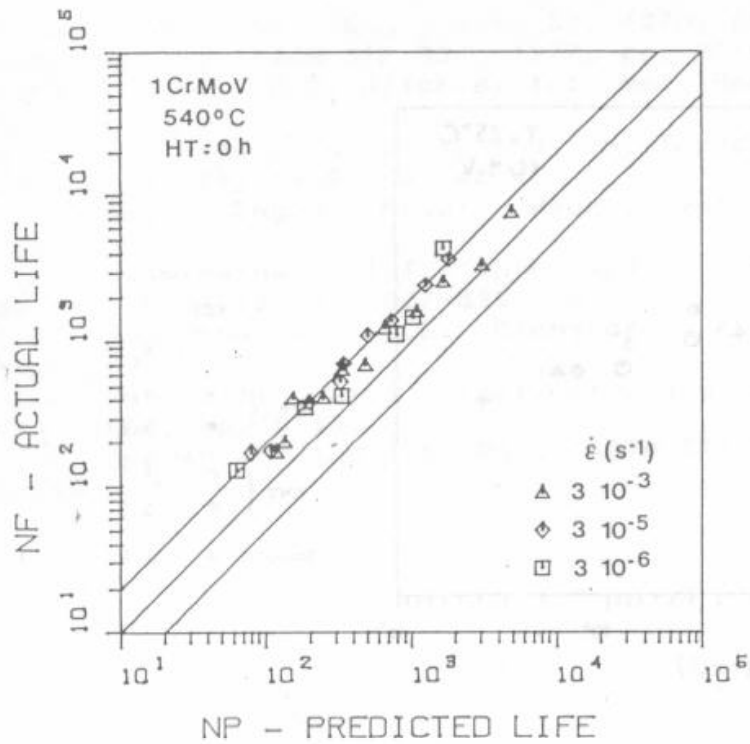


Fig.4 Capacita' predittiva del modello di crescita di piccole cricche in regime LCF: analisi su dati 1CrMoV.

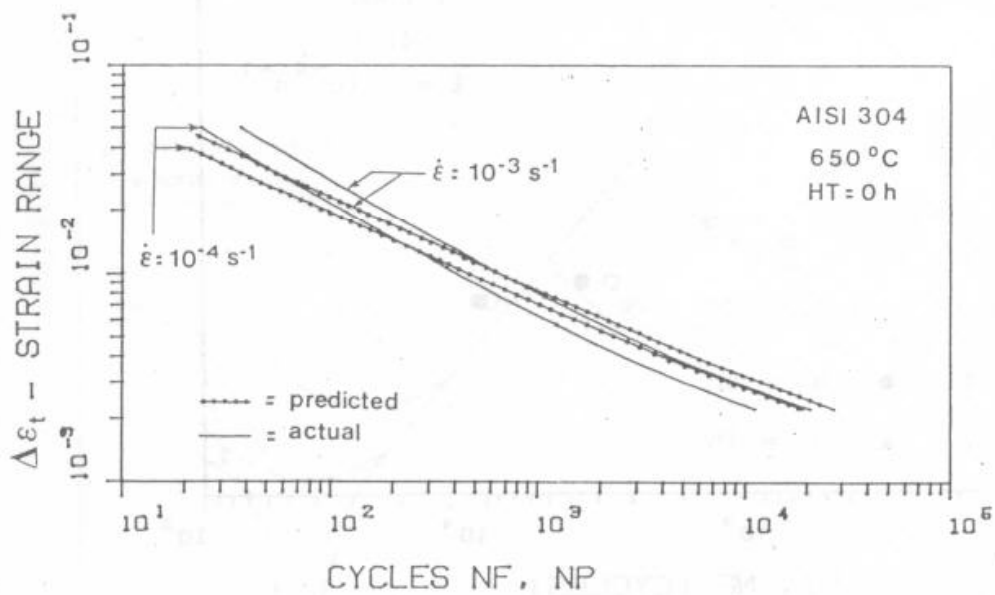


Fig.5 Capacita' predittiva del modello di crescita di piccole cricche in regime LCF: analisi su dati AISI304.

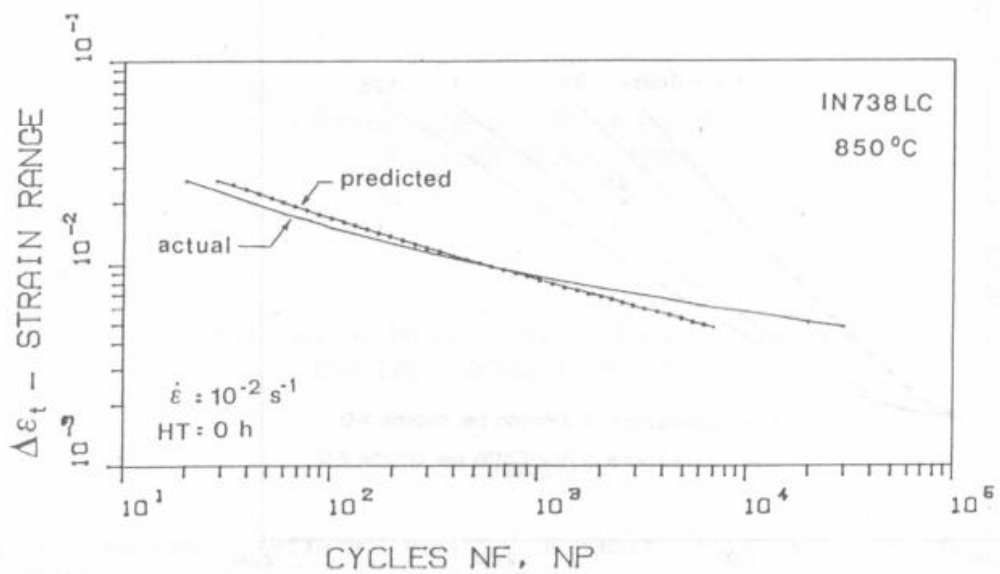


Fig.6 Capacita' predittiva del modello di crescita di piccole cricche in regime LCF: analisi su dati IN738.

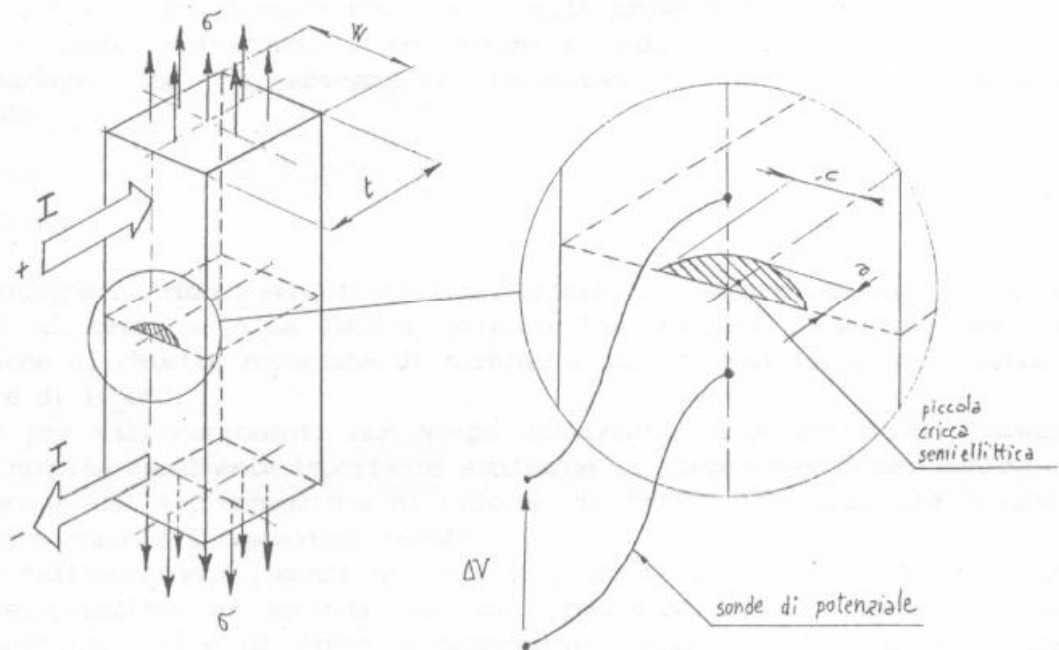


Fig.7 Configurazione del campione nell'analisi sperimentale del comportamento FCG di piccole cricche.

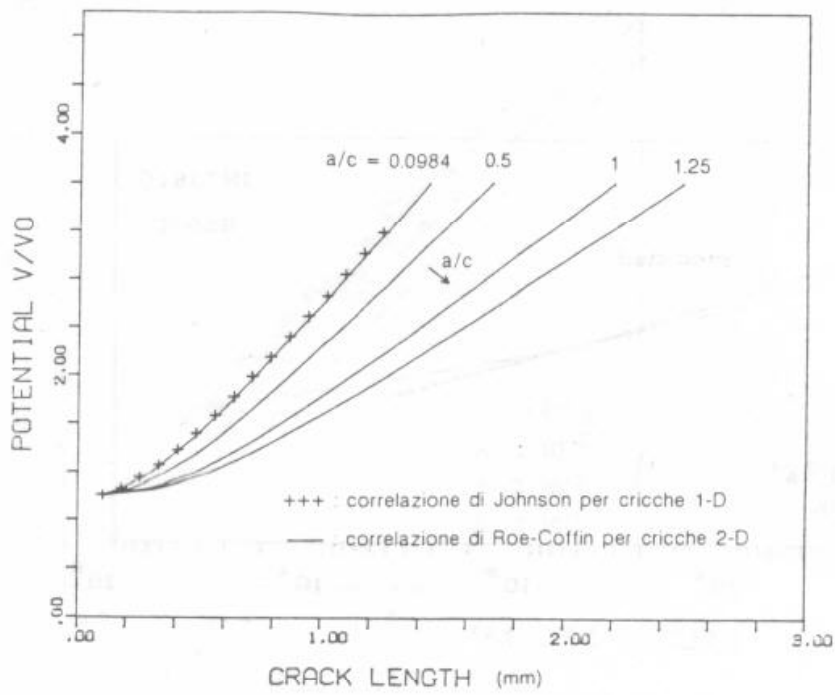


Fig.8 Curve di potenziale vs. lunghezza di cricca secondo le calibrazioni di Johnson (caso idealizzato 1-D) e di Roe-Coffin.