

DETERMINAZIONE DELLA LUNGHEZZA del DIFETTO IN UN PROVINO CT

da misure di deformazione e di potenziale elettrico

Franco M. Furgiuele, Leonardo Pagnotta e Andrea Poggialini

Dipartimento di Meccanica, Università della Calabria

87030 Arcavacata di Rende (Cosenza)

Sommario

Nel presente lavoro sono stati analizzati i metodi più comunemente impiegati per la determinazione della lunghezza del difetto in un provino CT sollecitato a fatica. In particolare sono stati indagati i metodi basati sulla misura della differenza di potenziale e sulla misura della deformazione; per entrambi vengono fornite le relative funzioni di calibrazione. Le funzioni, ottenute attraverso un'accurata analisi numerica, possono essere utilizzate, nel caso del metodo estensimetrico, per diversi valori della griglia estensimetrica, mentre nel caso del metodo elettrico, per diverse posizioni dei punti di misura. Entrambe le funzioni di calibrazione sono state verificate sperimentalmente.

Abstract

The present paper deals with the more widely employed techniques for crack length determination in compact-tension (CT) specimens subjected to cyclic loading. Electrical potential drop and strain measurements techniques were investigated and calibration curves for both methods are provided. The curves were determined by an accurate finite element analysis. The calibration curves can be used for different active lengths of strain gage in the strain measurements technique, and for different positions of the measuring point in the electrical potential drop technique. Both calibration curves have been experimentally verified.

1. Introduzione

Come è noto la velocità di propagazione di un difetto viene determinata sollecitando a fatica dei provini unificati [1] CT (Compact-Tension) o MT (Middle-Tension). Per l'automazione di tali prove [2,3] è necessario rilevare con continuità la lunghezza del difetto al variare del numero di cicli. Diversi metodi sono riportati in letteratura [1-4] e differiscono fra loro per la grandezza che viene rilevata e quindi correlata alla lunghezza del difetto.

Nel presente lavoro sono stati analizzati i metodi più noti per rilevare la lunghezza del difetto su un

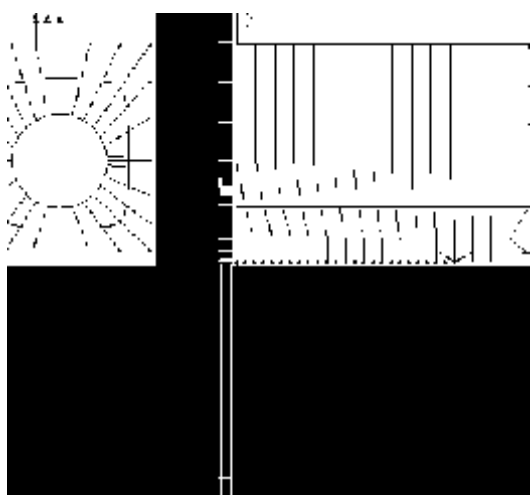
provino CT, che è di fatto il tipo di provino più largamente impiegato per l'esecuzione di prove di propagazione.

Il metodo più utilizzato per prove a temperatura ambiente è senz'altro quello che correla l'apertura del difetto (COD, Crack Opening Displacement) alla sua lunghezza. Altri metodi utilizzati sono quelli in cui la lunghezza del difetto è determinata o dalla differenza di potenziale, misurata su due punti in prossimità della bocca del provino quando questo viene attraversato da una corrente costante, o dalla deformazione rilevata mediante un singolo estensimetro posizionato sulla superficie posteriore del provino o, alternativamente, mediante due estensimetri il secondo dei quali posizionato sulla superficie superiore del provino stesso. Il metodo del COD per potere essere utilizzato a temperature elevate richiede delle prolunghie, in genere al quarzo, che ne limitano l'impiego a frequenze basse (fino a circa 3 Hz). Il metodo della differenza di potenziale deve il suo sviluppo alle possibilità di impiego anche a temperature ed ambienti estremi, inoltre, permette una misura completa delle dimensioni del difetto compresa la curvatura del fronte. Ovviamente il metodo può essere applicato solo a materiali conduttori, anche se con opportuni accorgimenti può essere utilizzato anche a materiali isolanti, applicando un foglio o un film conduttore sulla superficie del provino. In quest'ultimo caso è necessario assicurarsi che l'avanzamento del difetto nel foglio coincida con quello del provino e che il materiale d'apporto non influenzi l'avanzamento del difetto. Anche il metodo estensimetrico può essere impiegato a temperature elevate ed in ambienti ostili; può inoltre essere utilizzato per caratterizzare i materiali non metallici, quali i ceramici [5], su cui risulta difficoltoso fissare i coltelli del trasduttore utilizzato per la misura del COD.

Per un effettivo utilizzo di tutti i metodi prima citati è richiesta la conoscenza di una funzione di calibrazione che fornisca la lunghezza del difetto in funzione della grandezza misurata. In letteratura è trattata in modo esaustivo la funzione di calibrazione che correla l'apertura del difetto alla sua lunghezza. Pochi, invece, sono i dati riguardanti le funzioni di calibrazione quando la lunghezza del difetto è determinata dalla misura della differenza di potenziale o dalla misura della deformazione. Ovviamente, nel primo caso, i coefficienti di calibrazione dipendono dalla posizione dei punti di alimentazione e di misura, mentre, nel secondo caso, dipendono dalla base di misura dell'estensimetro o degli estensimetri e dalla posizione del secondo estensimetro.

Nel presente lavoro vengono fornite, per entrambi i metodi, le costanti di calibrazione ottenute attraverso un'accurata analisi numerica. Le funzioni fornite, nel caso del metodo estensimetrico, possono essere utilizzate per diversi valori della lunghezza della griglia estensimetrica, mentre nel caso del metodo del potenziale possono essere utilizzate per diverse posizioni dei punti di misura. Entrambe le funzioni di calibrazione ottenute sono state verificate sperimentalmente.

2. Metodo della misura del potenziale



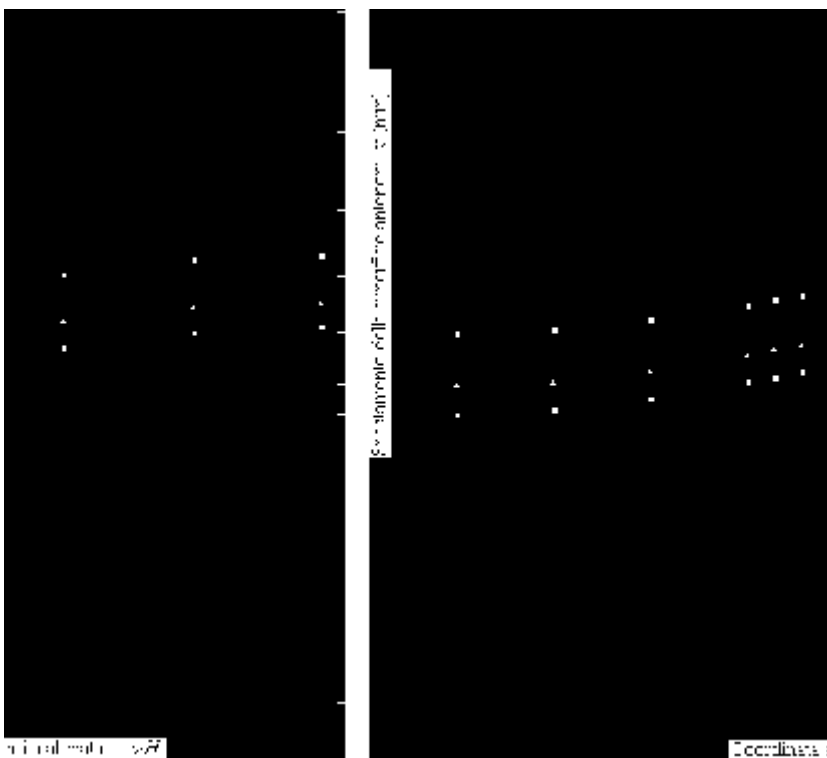
Nella sua forma più semplice il metodo consiste nel misurare la differenza di potenziale che si genera fra due punti della superficie anteriore del provino, disposti simmetricamente rispetto al piano del difetto, quando questo è attraversato da una corrente continua o alternata. Il campo elettrico generato, a parità di intensità di corrente, è funzione della geometria e delle dimensioni del difetto. Al crescere della lunghezza del difetto, per effetto della diminuzione della sezione resistente, si ha un aumento della resistenza elettrica e quindi della differenza di potenziale. La funzione di calibrazione che correla il potenziale misurato V alla lunghezza del difetto a è generalmente espressa come

$$a = f(V/V_r, a_r) \quad (1)$$

dove V_r è il potenziale di riferimento, misurato quando il difetto ha una lunghezza pari ad a_r . La funzione espressa nella forma precedente risulta particolarmente utile in quanto è indipendente dallo spessore del provino, dalla corrente applicata e dalle proprietà del materiale.

Per ottenere la funzione di calibrazione è sufficiente eseguire l'analisi del provino quando questo è attraversato da un flusso di corrente. Da un

punto di vista matematico, ciò equivale a risolvere



l'equazione di Laplace [6] in condizioni stazionarie. La soluzione di tale equazione può essere ottenuta, con opportuni accorgimenti [7], mediante un programma agli elementi finiti per l'analisi termostrutturale, sostituendo al flusso di corrente in ingresso un carico uniformemente distribuito. Per ottenere la soluzione in termini di potenziale elettrico a partire dalla soluzione degli spostamenti è necessario imporre le seguenti condizioni [7]: coefficiente di Poisson pari a zero, spostamenti in una direzione (x o y) nulli e spessore unitario.

Per ragioni di simmetria l'analisi è stata eseguita su una metà del provino unificato riportato in Fig. 1 ($H/W=0.6$). Il modello agli elementi finiti, riportato sulla stessa

figura, è stato realizzato con 162 elementi quadrilateri a 8 nodi e con 8 elementi triangolari a 6 nodi. Nella presente analisi, eseguita con il codice commerciale MSC/NASTRAN, sono stati posti a zero gli spostamenti lungo x , mentre il flusso di corrente in ingresso è stato simulato con un carico uniformemente distribuito sul lato di un elemento come evidenziato in Fig. 1. In tali condizioni lo spostamento v in direzione y di un punto generico rappresenta, a meno di un fattore di scala, il potenziale elettrico nel punto stesso. Ciò, da un punto di vista matematico, equivale alla soluzione dell'equazione di Laplace quando la conducibilità elettrica coincide con il modulo di Young [7]. Mediante l'analisi agli elementi finiti, eseguita per un valore unitario del modulo di Young, è stato possibile calcolare gli spostamenti v della superficie anteriore del provino, dove in genere viene misurato il potenziale. Il calcolo è stato ripetuto per diversi valori della lunghezza a del difetto, contenuti nell'intervallo (0.24-0.7) di a/W considerato nella normativa ASTM E 647 [1]. In fig. 2 sono riportati i valori nodali di v al variare della posizione del punto di misura. La curve approssimanti tali valori sono state ottenute con polinomi di terzo grado. Ovviamente, le curve di Fig. 2 possono essere utilizzate solo quando i punti di alimentazione coincidono con quelli indicati in Fig. 1, altrimenti è necessario eseguire una nuova analisi.

Essendo i punti di alimentazione adottati gli stessi di quelli suggeriti dalla normativa ASTM E647, è stato

possibile effettuare un confronto, per i punti di misura considerati da quest'ultima ($y=0.05 H$), fra i coefficienti della funzioni di calibrazione ottenuti con la presente analisi e quelli riportati nella normativa stessa. Lo spostamento di riferimento v_r è stato calcolato per una lunghezza del difetto a_r pari a $0.241 W$, che è ancora il valore suggerito in [1]. L'andamento del potenziale adimensionalizzato V/V_r (o dello spostamento adimensionalizzato v/v_r), nel punto di misura y , è stato determinato approssimando gli spostamenti, corrispondenti in Fig. 2 ai punti di intersezione delle curve con la linea tratteggiata, con un polinomio di terzo grado

$$V/V_r = A_0 + A_1 (a/W) + A_2 (a/W)^2 + A_3 (a/W)^3 \quad (2)$$

$$\text{per } 0.24 \leq a/W \leq 0.7$$

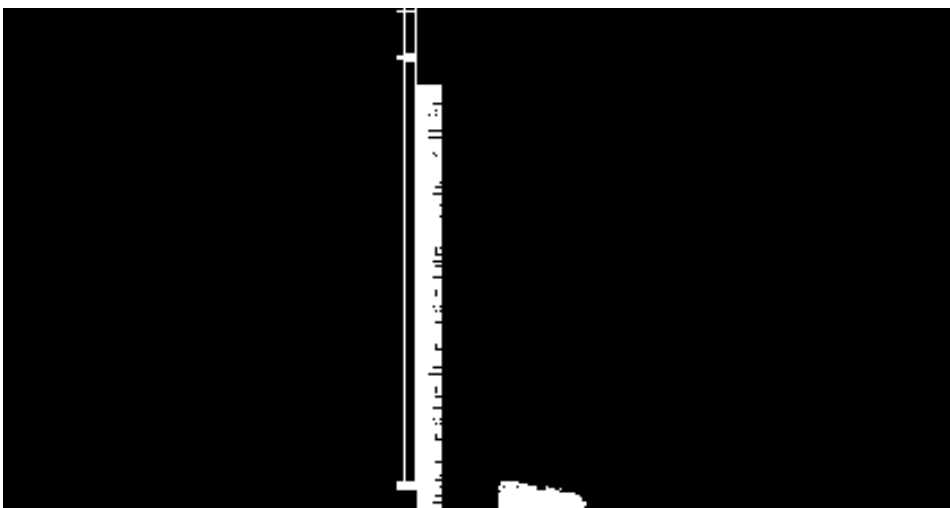
dove: $A_0=0.5761$, $A_1=1.921$, $A_2=-1.082$ e $A_3=1.698$. La massima differenza con i corrispondenti coefficienti riportati in [1] risulta inferiore all'1%. La funzione di calibrazione (1) può essere ottenuta esprimendo con notazione inversa l'eq. (2)

$$a/W = B_0 + B_1 (V/V_r) + B_2 (V/V_r)^2 + B_3 (V/V_r)^3 \quad (3)$$

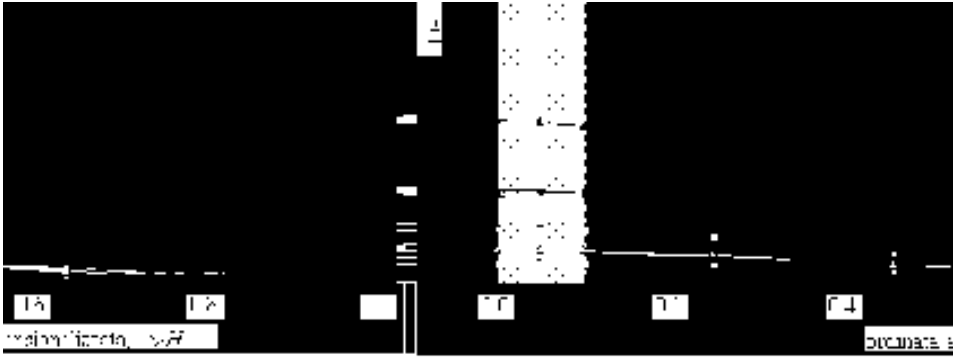
dove: $B_0=-0.5006$, $B_1=0.8732$, $B_2=-0.1296$ e $B_3=-0.002320$. I coefficienti calcolati sono in buon accordo con quelli riportati in [1] ad eccezione del coefficiente B_3 che risulta di un ordine di grandezza maggiore. Quest'ultimo coefficiente contribuisce comunque in modo poco significativo sulla funzione di calibrazione.

3. Metodo della misura della deformazione

Il metodo nella sua versione originaria, utilizzato in [8,9] per determinare il carico di richiusura del difetto e in [10] per monitorare la crescita del difetto, consiste nel rilevare la deformazione sulla superficie posteriore del provino mediante un estensimetro elettrico posizionato come illustrato in Fig. 3.

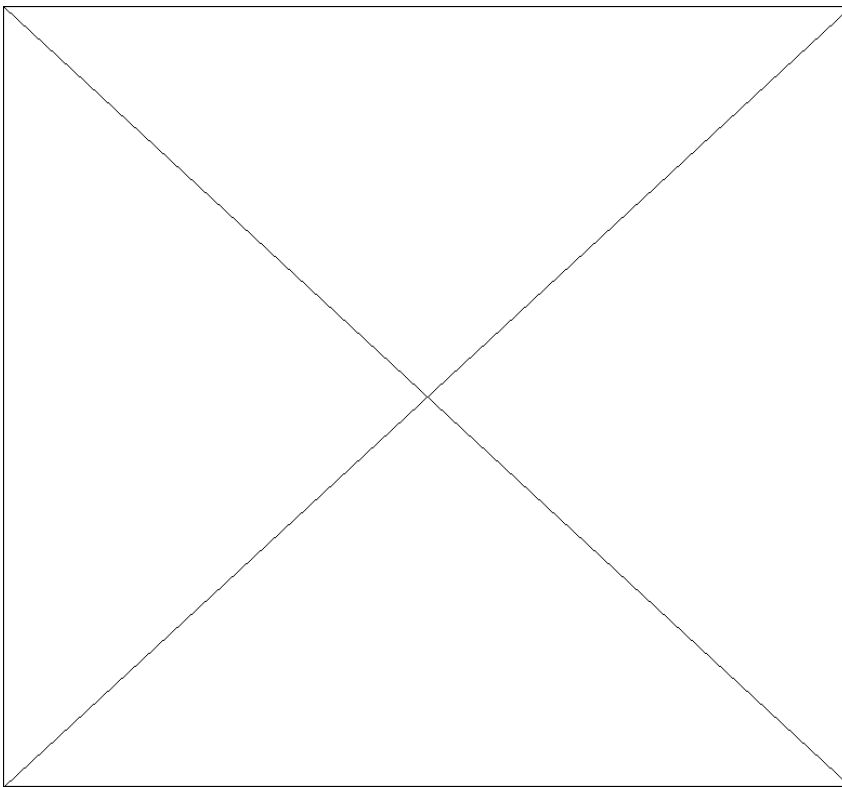


Nel presente lavoro, per ottenere la funzione di calibrazione che correla la misura della deformazione alla lunghezza del difetto, è stata condotta un'accurata analisi agli elementi finiti. Il provino analizzato ha lo spessore B , pari a $0.22 W$, ridotto rispetto a quello unificato per la determinazione del



valore critico del fattore di intensità degli sforzi [11], ma all'interno dell'intervallo B/W consigliato dalla normativa [1]. L'analisi è stata condotta in condizioni di stato piano di deformazione, per cui è stato possibile utilizzare

lo stesso modello agli elementi finiti di Fig. 1. L'ipotesi di deformazione piana, comunemente accettata in letteratura, è stata comunque verificata analizzando un modello tridimensionale. Il provino è stato sollecitato con una forza unitaria concentrata sulla generatrice superiore del foro. Le costanti elastiche del materiale, modulo di Young e coefficiente di Poisson, sono state poste, rispettivamente, pari a 193 GPa e 0.3. Le analisi sono state condotte per sette diversi valori della lunghezza del difetto a/W nell'intervallo 0.2-0.8. I risultati delle analisi in termini di deformazione ε_b della superficie posteriore del provino sono riportati in Fig. 3. Le curve, ottenute interpolando i valori nodali della deformazione, possono essere utilizzate per estensimetri con una qualsiasi base di misura. Ad esempio, per una base di misura di $0.12W$ ($y/H=0.1$), la deformazione media $\bar{\varepsilon}_b$ rilevata dall'estensimetro, per un valore di a/W pari a 0.7, può essere ottenuta effettuando il rapporto fra l'area ombreggiata in Fig. 3 e metà lunghezza della base di misura. Sulla stessa figura la linea tratteggiata indica l'estremità superiore della base di misura.



Dalla figura risulta evidente che la deformazione rilevata ad alti valori di a/W è notevolmente superiore, in valore assoluto, a quella rilevata ai valori più bassi. La sensibilità del metodo, come suggerito in [12], può essere incrementata, in modo significativo a bassi valori di a/W , sommando alla deformazione ε_b la deformazione ε_t della superficie superiore del provino. In Fig. 4 è illustrato l'andamento della deformazione ε_t al variare di x . Le curve, per ciascuno dei sette valori di a/W , sono state ottenute approssimando i valori nodali della deformazione con un polinomio di quinto grado. Analogamente al caso precedente, le curve di Fig. 4 possono essere utilizzate per estensimetri con una

qualsiasi base di misura.

Come si può osservare in figura, la deformazione, per $a/W=0.5$, risulta massima, in valore assoluto, nell'intorno di $x/W=0.7$; di conseguenza questa posizione rappresenta quella in cui il metodo raggiunge la sua massima sensibilità. Avendo utilizzato nella successiva fase di verifica sperimentale contemporaneamente diverse tecniche di misura, per ragioni di ingombro, l'estensimetro è stato posizionato a $0.5W$ dalla linea di carico. Considerando anche in questo caso una base di misura di $0.12W$, i valori della deformazione media, per $a/W=0.5$, rilevati dai due estensimetri risultano dello stesso ordine di grandezza. Pertanto l'utilizzo del secondo estensimetro permette di incrementare, al limite di

raddoppiare, la sensibilità del metodo.

In generale la deformazione $\bar{\epsilon}$ si ottiene sommando, per ogni valore di a/W , le deformazioni medie $\bar{\epsilon}_d$ e $\bar{\epsilon}_r$, calcolati, rispettivamente, dalle Figg. 3 e 4. In letteratura è usuale rappresentare la funzione di calibrazione in termini di "strain compliance" definita come il rapporto fra la deformazione e il carico P applicato. Questa grandezza viene adimensionalizzata moltiplicandola per $E B W$, dove E è il modulo di Young. I valori adimensionalizzati della "strain compliance" vengono comunemente approssimati con un polinomio di sesto grado [12,13]

$$-EB\bar{\epsilon}W/P = C_0 + C_1 (a/W) + C_2 (a/W)^2 + C_3 (a/W)^3 + C_4 (a/W)^4 + C_5 (a/W)^5 + C_6 (a/W)^6 \quad (4)$$

per $0.2 \leq a/W \leq 0.8$

La funzione di calibrazione per un pratico utilizzo viene in generale espressa con notazione inversa come

$$a/W = D_0 + D_1 U + D_2 U^2 + D_3 U^3 + D_4 U^4 + D_5 U^5 + D_6 U^6 \quad (5)$$

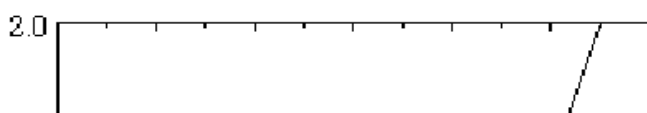
dove la grandezza U , in analogia alla funzione di calibrazione utilizzata nel metodo del COD, viene posta pari a

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{-EB\bar{\epsilon}W/P}} \quad (6)$$

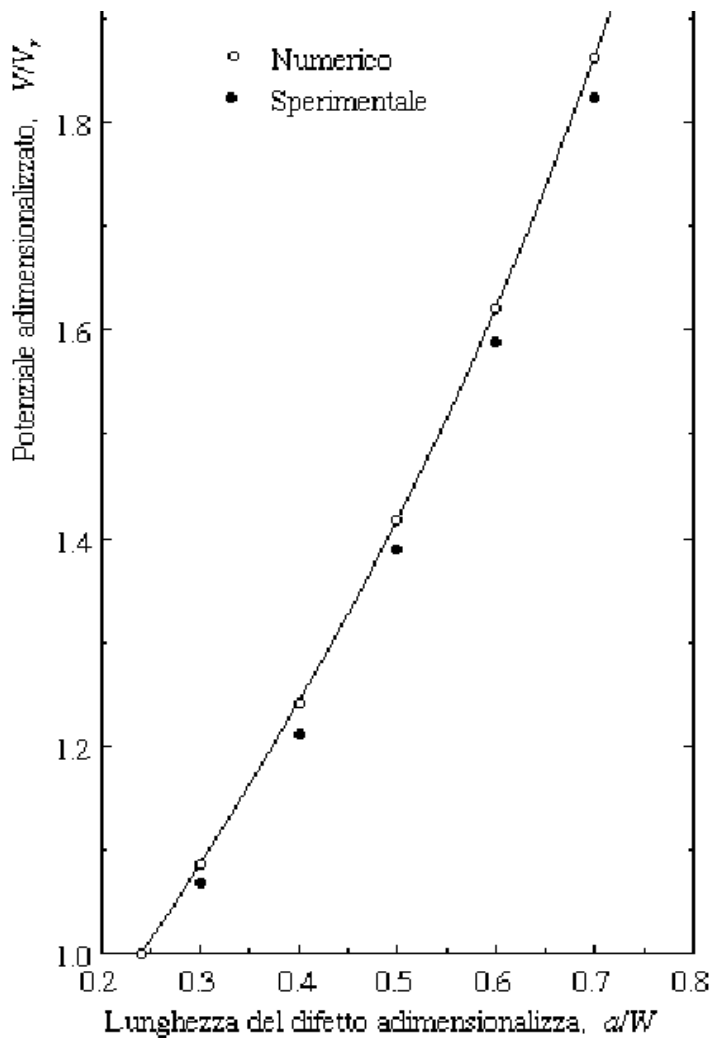
4. Validazione sperimentale

Le procedure descritte in precedenza permettono di ottenere facilmente le funzioni di calibrazione per provini unificati. Nel presente lavoro le procedure sono state applicate e verificate su un provino in acciaio di larghezza e spessore pari, rispettivamente, a 50 mm e 11 mm.

Nel caso del metodo della differenza di potenziale la verifica è stata effettuata posizionando i punti di misura ad una distanza y dal piano del difetto pari a $0.42H$. In Fig. 5 è riportato l'andamento del potenziale elettrico al variare della lunghezza del difetto ottenuto approssimando con il polinomio (2) i punti di intersezione delle curve di Fig. 2 con la retta verticale passante per $y/H=0.42$. Sulla stessa figura sono riportati i valori del potenziale rilevati sperimentalmente. La sperimentazione è stata eseguita intagliando il provino con un filo conduttore di 150 μm su una macchina ad elettroerosione. In tale modo, oltre a ridurre i tempi della fase sperimentale, viene garantita la propagazione simmetrica del difetto. I punti di alimen-

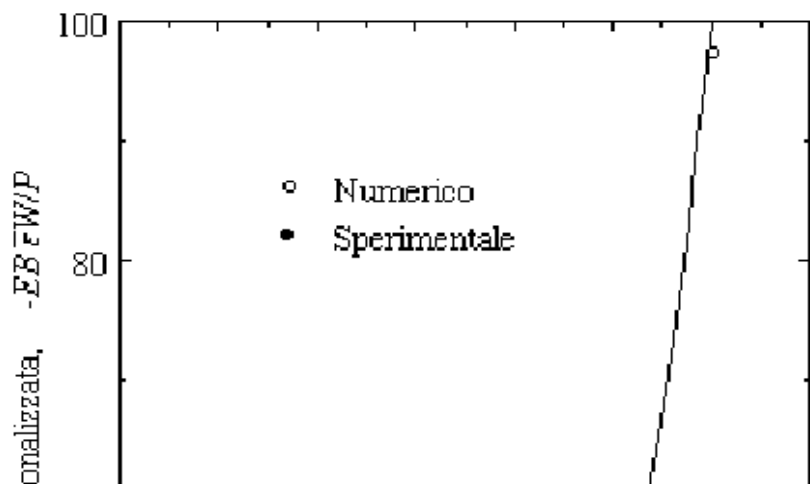


tazione del provino coincidono con quelli di Fig. 1 e sono posizionati a metà dello



La zona di lavorazione dalle particelle erose. La lunghezza del difetto è stata misurata con continuità mediante un comparatore centesimale, di corredo alla macchina, che fornisce direttamente l'avanzamento del filo. Come si può osservare in Fig. 5 i valori sperimentali risultano sempre minori dei corrispondenti valori ottenuti numericamente. Ciò è da imputare al sistema di misura utilizzato che rileva, a causa della cedevolezza del filo, una lunghezza del difetto maggiore di quella effettiva.

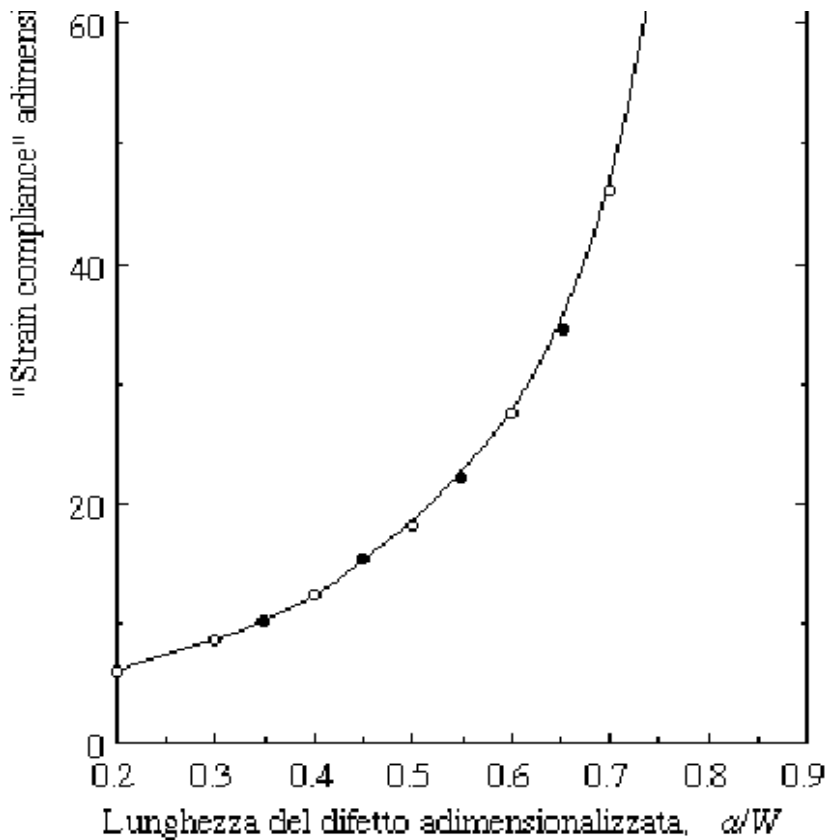
Un'ulteriore verifica è stata eseguita utilizzando la funzione di calibrazione, ovvero i coefficienti dell'eq. (3) durante una reale prova di propagazione. Il difetto, in questo caso, è stato fatto propagare sollecitando a fatica il provino su una macchina di prova materiali e rilevando con continuità, contemporaneamente, la lunghezza del difetto, utilizzando il metodo del COD ed un microscopio 25x dotato di reticolo di misura (passo 0.05 mm), e la differenza di potenziale con il sistema di misura appena descritto. Il confronto, fra i valori della lunghezza del difetto determinati dalla misura del potenziale utilizzando l'eq. (3) ed i valori misurati con le altre due tecniche, ha mostrato un accordo pienamente soddisfacente.



spessore. Anche i punti di misura sono stati posti a metà dello spessore e come riportato in precedenza ad una distanza y di $0.42 H$ dal piano del difetto. Tale scelta è stata imposta dalla presenza dei coltelli del trasduttore per la misura del COD nella zona di massima sensibilità del metodo che si ha in corrispondenza della zona di intaglio. Ovviamente, la disposizione utilizzata non permette di tenere in considerazione eventuali effetti della curvatura del fronte del difetto, che invece possono essere considerati quando i punti di misura sono disposti in modo antisimmetrico rispetto al piano medio del provino e al piano di frattura.

Il provino è stato alimentato in corrente continua mediante un generatore di tensione della Hewlett Packard mod. 6205B collegato ad un amplificatore operazionale bipolare KEPCO con un fondo scala di ± 20 A. La tensione prima di essere misurata, mediante un voltmetro digitale, viene inviata ad un amplificatore estensimetrico SG-411A, della Sint Technology, opportunamente adattato allo scopo. La misura viene eseguita direttamente sulla macchina ad elettroerosione dopo avere decontaminato la

Nel caso del metodo della deformazione sono stati applicati sul medesimo provino due estensimetri di uguale base di misura pari a 6 mm. In questo caso sono state utilizzate le curve delle Figg. 3 e 4 per calcolare i coefficienti del polinomio (4). L'estensimetro sulla faccia superiore è posizionato a $W/2$ dalla linea di carico. In Fig. 6 è riportato l'andamento della "strain



compliance" adimensionalizzata al variare della lunghezza del difetto. Anche in questo caso è stato eseguito un confronto fra i valori di deformazione ottenuti dal grafico e quelli misurati sperimentalmente per un valore noto della lunghezza del difetto anch'essa adimensionalizzata. La deformazione ϵ è stata misurata effettuando un collegamento a ponte completo con quattro estensimetri elettrici da 120 Ω . I due estensimetri attivi posizionati sulla faccia posteriore e superiore del provino sono stati disposti sui lati opposti del ponte. I due estensimetri compensatori sono stati disposti su un secondo provino, identico al precedente, nelle stesse posizioni degli estensimetri attivi. Il ponte è stato alimentato dall'amplificatore

SG-411A, utilizzato in precedenza. Le misure di deformazione sono state eseguite direttamente sulla macchina di prova materiali, applicando al provino un livello di carico noto e rilevando la lunghezza del difetto mediante il microscopio e la misura del COD. I valori di deformazione rilevati sperimentalmente e quelli ottenuti dal grafico di Fig. 6 sono risultati in buono accordo.

La funzione di calibrazione espressa dall'eq. (5), ottenuta utilizzando i valori della "strain compliance" di Fig. 6, è stata utilizzata per determinare la lunghezza del difetto di un provino sollecitato a fatica sulla macchina di prova materiali. I valori della lunghezza del difetto determinati dalla misura di deformazione e quelli ottenuti dalla misura del COD e dal rilievo diretto, sono risultati anch'essi in buono accordo.

5. Conclusioni

I grafici, riportati nel presente lavoro, permettono di ottenere in modo relativamente semplice e rapido le curve di calibrazione necessarie per l'applicazione dei metodi del potenziale e della deformazione alla misura della lunghezza del difetto in un provino CT unificato. Le verifiche sperimentali effettuate hanno accertato la validità dei risultati ottenuti attraverso l'analisi numerica. Le funzioni di calibrazione, consentendo di monitorare con continuità la crescita del difetto, potranno senz'altro essere utilizzate con successo per l'automatizzazione delle prove di propagazione.

Bibliografia

1. ASTM Standard E 647-95a, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 03.01, 1996.
2. *Special Applications and Advanced Techniques for Crack Size Determination*, ASTM STP 1251, J. J. Ruschau and J.K. Donald, Eds., 1995.
3. *Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth*, ASTM STP 877, W. H.

Cullen, R.W. Landgraf, L. R. Kaisand and J. H. Underwood, Eds., 1985.

4. *Automation in Fatigue and Fracture: Testing and Analysis*, ASTM STP 1231, C. Amzallag, Ed., 1994.

5. R.H. Dauskardt, D.B. Marshall and R.O. Ritchie, *J. Am. Ceram. Soc.*, 73, 893 (1990).

6. R.O. Ritchie and K.J. Bathe, *Int. Journ. of Fracture*, 20, 15, 47 (1979).

7. M.A. Hicks and A.C. Pickard, *Int. Journ. of Fracture*, 20, 91 (1982).

8. K. Kikukawa, M. Jono and K. Tanaka, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials*, Boston, ASM, 254 (1976).

9. J.E. Allison, *Fracture Mechanics: Eighteenth Symposium*, ASTM STP 945, D.T. Read and R.P. Reed, Eds, 913 (1988).

10. W.F. Deans and C.E. Richards, *J. of Testing and Evaluation*, 7, 147 (1979).

11. ASTM Standard E 399-90, *Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 03.01, 1996.

12. D.C. Maxwell, *Strain based Compliance Method for Determining Crack Length for a C(T) Specimen*, AFWAL-TR-87-4046, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA, 1987.

13. C.J. Gilbert, J.M. McNaney, R.H. Dauskardt and R.O. Ritchie, *J. of Testing and Evaluation*, 22, 117 (1994).

Atti del convegno

[[Precedente](#)] [[Successiva](#)]

Versione HTML realizzata da

