

PREVISIONE DELLA PROPAGAZIONE DI FESSURE PER FATICA IN PRESENZA DI TENSIONI RESIDUE

M.Beghini. L.Bertini

Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari
Università di Pisa

--- 0 ---

SOMMARIO

Il presente lavoro riguarda la valutazione degli effetti prodotti dalle tensioni residue sulla propagazione di fessure per fatica. Dopo una discussione generale sui principali aspetti fenomenologici del problema, sono riportati i risultati di prove di propagazione per fatica su provini di tipo Compact Tension. Due metodi numerici, ovvero il metodo degli Elementi Finiti e il metodo delle 'Weight Function' sono stati applicati per descrivere gli effetti prodotti dalle tensioni residue e hanno permesso di ottenere una accurata analisi dei risultati sperimentali.

LISTA DEI SIMBOLI

a : lunghezza di fessura;
 a_0 : lunghezza dell'intaglio fresato;
 E : modulo di Young;
 $h(x,a)$: Weight Function (WF);
 K : Fattore di Intensificazione degli Sforzi (FIS);
 K_{res} , K_{ext} , K_{eff} : rispettivamente 'residuo', 'esterno' e 'effettivo' valore di K;
 K^{min} , K^{max} : minimo e massimo valore di K;
 K_{op} : valore esterno di K per l'apertura completa della fessura;
 R : rapporto K^{min}/K^{max} ;
 $v(x,a)$: funzione che esprime l'apertura delle superfici della fessura;
 ν : modulo di Poisson;
 W : larghezza del provino;
 δ : dimensione della zona di contatto;
 σ : tensione nominale.

INTRODUZIONE

L'integrità di molti componenti strutturali, in particolare quando questi possono essere sottoposti a un sensibile danno di fatica durante la loro vita operativa, può essere sensibilmente influenzata dalla presenza di tensioni residue. Queste, in molti casi, costituiscono una conseguenza indesiderata delle tecnologie di realizzazione o di collegamento (come ad es. la formatura a freddo e la saldatura) le quali possono richiedere l'impiego di opportune tecniche per minimizzarne gli effetti quando si prevede che siano dannosi per la resistenza del materiale. In altri casi, viceversa, stati di tensione residua sono intenzionalmente prodotti mediante l'uso di procedimenti specifici (come la pallinatura) proprio allo scopo di incrementare la resistenza a fatica.

Tra i campi di maggior interesse per questo genere di fenomeni va sicuramente citato il settore delle grandi strutture saldate, come ad esempio le piattaforme 'offshore'. Allo scopo di garantire l'integrità strutturale per queste strutture, è importante risolvere il problema della corretta previsione dell'influenza esercitata da campi di autotensioni sulla velocità di propagazione delle fessure per fatica (FCGR: Fatigue Crack Growth Rate). È stato infatti evidenziato da diversi autori [1,2] che tale influenza può essere di rilevante entità.

Nel corso dell'ultimo decennio, un significativo sforzo è stato rivolto allo sviluppo di tecniche per la previsione quantitativa dell'influenza delle tensioni residue sulla velocità di crescita delle fessure. Una delle tecniche più promettenti è il metodo delle 'Weight Functions' (WF) che è stato applicato con successo da vari sperimentatori (per una revisione critica si rimanda a [3]) allo scopo di studiare il comportamento di fessure in geometrie semplici o idealizzate. A tale proposito anche il Metodo degli Elementi Finiti (MEF) può essere considerato un potente strumento per la valutazione degli effetti prodotti dalle tensioni residue.

Nella prima parte della presente memoria sono esposte alcune osservazioni generali sui meccanismi mediante i quali le tensioni residue interagiscono con fessure propagantesi sotto carichi ciclici. Successivamente, sono riassunti i risultati di prove di propagazione su provini Compact Tension (CT) e sono analizzati in relazione alle previsioni dei modelli matematici basati sia sulle WF che sul MEF.

ASPETTI GENERALI DELLA PROPAGAZIONE PER FATICA IN CAMPI DI AUTOTENSIONI

In presenza di tensioni residue, il valore vero (effettivo) del fattore di intensificazione degli sforzi (FIS), K_{eff} , può differire in modo sensibile dal valore calcolato in base al carico esterno, K_{ext} . Come regola generale, tale differenza non è soltanto una funzione della distribuzione delle autotensioni ma anche del valore del carico esterno, poichè la effettiva geometria della fessura può essere modificata durante il ciclo di carico dal manifestarsi di contatti tra le superfici della fessura stessa i cui effetti devono essere adeguatamente considerati per effettuare una corretta valutazione del K_{eff} .

In relazione a questo problema, si possono distinguere tre diverse situazioni (Fig.1):

- la fessura è completamente aperta;
- l'apice della fessura è aperto mentre la superficie della fessura è parzialmente chiusa;
- la fessura è completamente chiusa.

Nel caso in cui la fessura si presenti completamente aperta (Fig. 1a), il valore effettivo del FIS può essere facilmente ottenuto, in accordo con il principio di sovrapposizione, come semplice somma algebrica dei contributi dati dal carico esterno applicato (K_{ext}) e dalle tensioni residue (K_{res}) come se agissero separatamente:

$$K_{eff} = K_{ext} + K_{res} \quad (1)$$

Se, sotto l'effetto del carico esterno e delle tensioni residue, la fessura non è completamente aperta ma le sue superfici si toccano in qualche punto, allora insorge una non linearità connessa con la condizione di contatto. L'equazione (1) che è basata sul principio di sovrapposizione non può essere pertanto applicata e, dato che la forma e la dimensione della superficie di contatto dipendono dal valore del

carico applicato, risulta di solito necessaria una tecnica di analisi iterativa per la valutazione del FIS. Questa situazione è tipica di fessure che si trovano immerse in un campo di tensioni residue che cambia di segno, con l'apice collocato nella zona di trazione (Fig. 1b).

Infine, se l'apice della fessura è completamente chiuso, il che può verificarsi quando la fessura stessa è completamente immersa in un campo di tensioni di compressione (Fig. 1.c), il FIS può essere assunto pari a 0. Come nel caso di fessure chiuse parzialmente anche in questa circostanza è usualmente richiesta una analisi non lineare del contatto.

Nel corso di un ciclo di fatica, tutte le tre situazioni descritte possono verificarsi durante l'escursione del carico esterno tra i suoi valori estremi. Pertanto, il K_{eff} non dipende linearmente dal valore nominale applicato del FIS e quindi non solo i valori estremi del K (ovvero K^{min} e K^{max}) e quindi anche la forma del ciclo stesso può essere modificata.

Nei problemi pratici, questo effetto di forma può essere trascurato quando si fa riferimento alla propagazione in ambiente inerte, dove il comportamento del materiale dipende in larga misura solo dai valori estremi di K. Peraltro, questa semplificazione può non essere ammissibile qualora si abbiano da trattare fenomeni di corrosione-fatica per i quali è nota la sensibilità della velocità di avanzamento dalla 'forma d'onda' del ciclo di carico.

Il campo di variazione effettivo del FIS ed il rapporto R per un dato ciclo di fatica sono esprimibili mediante le seguenti relazioni:

$$\Delta K_{eff} = K_{eff}^{max} - K_{eff}^{min} \quad (2)$$

$$R_{eff} = K_{eff}^{min} / K_{eff}^{max}$$

In generale, in corrispondenza del massimo carico applicato, la fessura si presenta completamente aperta e pertanto, K_{eff}^{max} può essere valutato semplicemente in base all'equazione (1). Al contrario, per il carico minimo applicato, entrambe le condizioni descritte possono verificarsi in relazione alla distribuzione di tensioni residue agenti. In relazione a queste osservazioni, le equazioni (2) possono essere riscritte nel seguente modo:

- per fessure completamente aperte al minimo carico:

$$\Delta K_{eff} = \Delta K_{ext} \quad (3)$$

$$R_{eff} = (K_{ext}^{min} + K_{res}) / (K_{ext}^{max} + K_{res})$$

- per fessure parzialmente aperte al minimo carico:

$$\Delta K_{eff} = K_{ext}^{max} + K_{res} - K_{eff}^{min} \quad (4)$$

$$R_{eff} = K_{eff}^{min} / (K_{ext}^{max} + K_{res})$$

dove $K_{eff}^{min} > 0$ e $> K_{ext}^{min} + K_{res}$

- per fessure completamente chiuse al minimo carico:

$$\Delta K_{eff} = K_{ext}^{max} + K_{res} \quad (5)$$

$$R_{eff} = 0$$

Mentre entrambi i metodi WF e EF possono essere applicati in modo

abbastanza diretto per fessure completamente aperte, una maggiore attenzione è invece richiesta quando si considerano fessure parzialmente aperte. Nella presente memoria entrambi i metodi sono impiegati per l'analisi delle situazioni descritte con applicazione all'esame di dati sperimentali di propagazione in provini CT contenenti cordoni di saldatura longitudinali.

DESCRIZIONE DELLE OSSERVAZIONI SPERIMENTALI

Viene di seguito riportato un sommario delle tecniche applicate e dei risultati ottenuti, sia per quanto riguarda la valutazione del FCGR che per la misura della distribuzione di tensioni residue. Per una trattazione più completa si rimanda a [4,5].

Le prove di FCGR sono state condotte in accordo con la norma ASTM E647, utilizzando provini CT con spessore 12 mm e larghezza 60 mm ricavati da una lamiera di 20 mm di spessore secondo l'orientamento 'LT'. Il materiale impiegato è un acciaio al carbonio manganese con 490 MPa di tensione di snervamento e 510 MPa di rottura. Sono stati provati sia provini di materiale base sia provini contenenti un cordone di saldatura longitudinale (Fig. 2). La giunzione è stata ottenuta mediante saldatura all'arco in ambiente inerte seguita da un trattamento termico di distensione consistente in un periodo di 25 minuti a 575°C.

I valori di FCGR misurati sul materiale base e sui provini saldati sono riportati in Fig. 3. Si osserva chiaramente che questi ultimi mostrano una significativa diminuzione di velocità di propagazione in particolare per i più bassi valori di ΔK . Inoltre, l'analisi del valore misurato del 'Back Face Strain' (ovvero il valore della deformazione sulla superficie posteriore centrale del provino) in funzione del ciclo di carico per i provini saldati ha mostrato un significativo effetto di chiusura delle superfici di fessura. Tale chiusura è indicata con chiarezza da un brusco cambiamento di pendenza della curva carico-deformazione (Fig. 4) che non si riscontra nella curva dei provini di materiale base sotto le medesime condizioni sperimentali. Il valore esterno del FIS a cui si manifesta il completo distacco delle superfici della fessura sarà indicato come K_{op} nel seguito.

Individuata nella presenza di tensioni residue la causa della differenza di comportamento tra i due tipi di provino, sono state effettuate alcune misure per determinarne l'andamento. La tecnica adottata si basa sull'accoppiamento di misurazioni dirette di distribuzione di deformazione insieme con i risultati di una analisi FE del provino CT [4]. Le misure sono state ottenute sezionando il cordone dopo l'incollaggio di estensimetri elettrici a resistenza di piccola dimensione. Una successiva analisi con EF ha permesso di derivare, tramite la determinazione di opportuni coefficienti di influenza, uno stato di 'deformazione iniziale' che riproducesse i valori di deformazioni residue misurate.

Questa tecnica ha permesso una stima della distribuzione degli sforzi residui sull'intero provino che è stata successivamente impiegata anche per l'applicazione del metodo delle Weight Function. Inoltre, la distribuzione di 'deformazione iniziale' è stata utilizzata per riprodurre direttamente, mediante modello agli EF, le influenze prodotte dalle tensioni residue nel provino fessurato sul valore effettivo del FIS.

ANALISI MEDIANTE GLI ELEMENTI FINITI

È stato sviluppato un apposito modello per il provino CT sul quale sono state condotte le analisi numeriche dello stato di tensione. Per la completa simmetria, solo metà del provino è stato modellato in un 'mesh' che comprende circa 250 elementi tipo 'plane stress' e 500 gradi di libertà (Fig. 5). La zona critica all'apice della fessura è stata discretizzata mediante una disposizione polare di elementi con dimensione radialmente crescente a partire da un valore pari a circa 1/50 della lunghezza di fessura. L'analisi è stata effettuata in campo lineare elastico con deformazioni infinitesime utilizzando il programma ANSYS nella versione PC per uso Universitario.

Il valore del FIS è stato ricavato a partire dal J-integrale calcolato mediante un programma opportunamente sviluppato che esegue l'integrazione numericamente su più percorsi concentrici attorno all'apice della fessura. I calcoli sono stati effettuati per una serie di lunghezze di fessura che copre l'intero campo di interesse per le misure di propagazione per fatica. Il confronto tra i risultati ottenuti e le soluzioni fornite della norma ASTM nel caso di solo carico esterno applicato [6], ha mostrato un soddisfacente accordo essendo le differenze contenute entro il 5% per l'intero campo di fessure considerato. Peraltro, è stato introdotto un fattore di correzione allo scopo di ridurre ulteriormente tale differenza entro limiti estremamente contenuti (meno di 1%). Questo metodo ha reso i risultati delle presente analisi più comparabili con quelli ottenuti da altri autori e ha permesso di tener conto di alcuni effetti tra cui:

- la tridimensionalità del profilo di K lungo il fronte della fessura;
 - le distorsioni locali causate dalla presenza dei fori per la applicazione del carico;
 - spostamenti e deformazioni non lineari per fessure lunghe;
- che sono empiricamente inclusi nella relazione ASTM.

Al fine di ottenere una stima dell'effettiva variazione del FIS durante il ciclo di fatica, sono state analizzate entambe le condizioni di carico massimo e di carico minimo accoppiate con lo stato di deformazioni residue per ogni lunghezza di fessura. Oltre a ciò è stato valutato il carico necessario al raggiungimento del completo distacco delle superfici della fessura. Per tener conto dei fenomeni di richiusura in corrispondenza dei valori minimi del carico, è stata impiegata una procedura iterativa che permette di simulare l'azione di vincoli unilaterali agenti sulle superfici di fessura tra 'a₀' e 'a' (Fig. 5)

ANALISI MEDIANTE LE WEIGHT FUNCTION

L'applicazione del principio di sovrapposizione si rivela particolarmente adatta allo studio di casi nei quali sia necessario valutare il FIS per una medesima geometria e con diverse condizioni di carico applicate. Nei problemi piani, il valore del FIS può essere ricavato mediante integrali [7] della forma:

$$K = \int_0^a \sigma(x) \cdot h(x,a) \cdot dx \quad (6)$$

in cui 'a' rappresenta la lunghezza di fessura, $\sigma(x)$ la tensione nel provino non fessurato (indicata come tensione 'nominale') mentre $h(x,a)$

è una funzione che dipende dalla geometria e dalle condizioni di vincolo ma è indipendente dal tipo di carico. La conoscenza della Weight Function $h(x,a)$ permette una rapida soluzione del problema dato che è solitamente semplice valutare l'andamento delle tensioni in un corpo non fessurato (ad esempio mediante analisi MEF con un numero relativamente modesto di gradi di libertà). La validità dell'impiego del metodo di sovrapposizione è stata verificata anche nei casi di tensioni termiche o residue [8].

Sono stati proposti diversi metodi per valutare le WF e varie soluzioni sono disponibili per alcuni casi di pratico interesse [7,9]. Il loro significato fisico può essere direttamente ricavato dall'equazione (6): $h(x,a)$ rappresenta numericamente il valore di K prodotto da una coppia di forze unitarie, applicate in posizione generica 'x', per una fessura di lunghezza 'a' (Fig. 6); questa considerazione suggerisce un modo per ottenere il valore delle WF numericamente attraverso una serie di analisi agli EF.

Mediante questo metodo, sono state individuate delle adatte WF per il provino CT [6] nell'intero campo di interesse per le lunghezze di fessura. L'espressione ottenuta è la seguente:

$$h(x,a) = 2 \sqrt{\frac{a}{\pi}} \frac{1 + \beta \cdot (a-x) + \alpha \cdot (a-x)^2}{\sqrt{a^2 - x^2}} \quad (7)$$

nella quale α e β sono funzioni della lunghezza di fessura. L'espressione (7) permette inoltre di ottenere una soluzione in forma chiusa dell'integrale (6) se le tensioni nominali sono rappresentate mediante una funzione lineare a tratti. Le espressioni di α e β (con 'x' e 'a' espresse in mm nell'equazione (7)) sono state ricavate mediante una tecnica di 'best fit' polinomiale con fattori di correlazione maggiori di 0.98:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.0179 - 1.882 \cdot 10^{-3} \cdot \mu + 7.231 \cdot 10^{-5} \cdot \mu^2 - 1.221 \cdot 10^{-6} \cdot \mu^3 + 7.724 \cdot 10^{-9} \cdot \mu^4 \\ \beta &= -0.341 + 0.0339 \cdot \mu - 8.828 \cdot 10^{-4} \cdot \mu^2 + 8.765 \cdot 10^{-6} \cdot \mu^3 \end{aligned} \quad (8)$$

dove $\mu = a/W$ nel campo: $0.36 \leq \mu \leq 0.70$.

Le espressioni (7) e (8) consentono una previsione del K con un errore minore del 2% rispetto alla soluzione ASTM per il carico esterno applicato.

È stato successivamente ricavato lo stato di tensione nominale sulla parte non fessurata del provino (tratto $W-a_0$) con un modello agli EF del tipo di quelli precedentemente descritti e con $a=a_0$. Nella figura 7 sono riportati: lo sforzo nominale residuo, lo sforzo nominale esterno (corrispondente al valore minimo del carico) e la loro somma. Si può osservare che la zona adiacente all'apice dell'intaglio si trova in uno stato di sforzo combinato di compressione mentre pochi millimetri più avanti la tensione cambia di segno. L'integrazione (6) è stata effettuata sulla lunghezza fisica di fessura ($a-a_0$) e per ogni lunghezza 'a' esaminata sono stati determinati due valori di K : K_{ext} integrando la tensione nominale prodotta dal carico esterno e K_{res} integrando le tensioni nominali residue.

La conoscenza della WF permette inoltre una valutazione diretta dello spostamento dei lati della fessura mediante la seguente espressione [7]:

$$v(x,a) = \frac{2}{H} \int_x^a K(a) \cdot h(x,a) \cdot da \quad (9)$$

in cui 'v' rappresenta lo spostamento in corrispondenza dell'ascissa 'x' in una fessura di lunghezza 'a' e $H=E$ (modulo di Young) nel caso di 'plane stress' e $E/(1-\nu^2)$ per il 'plane strain'. Possono verificarsi due condizioni distinte:

- 1) $v(x,a) \geq 0$ per $a_0 \leq x \leq a$;
- 2) $v(x,a) < 0$ in qualche punto $a_0 \leq x \leq a$.

Nel primo caso, una semplice somma algebrica dei due valori del FIS fornisce la corretta valutazione del K_{eff} ; nel secondo caso questa procedura produce una sottostima del K effettivamente applicato in quanto viene trascurato l'effetto delle tensioni di contatto.

In generale, la valutazione esatta del valore effettivo di K in questo secondo caso rappresenta un problema complesso a causa della condizione indefinita di contatto che introduce una non linearità ineliminabile nel problema e, in tale situazione, lo stesso impiego delle WF è discutibile dato che il corpo subisce una modifica delle sue condizioni di vincolo. Nel caso esaminato del provino CT, sia l'analisi agli EF che le valutazioni tramite la relazione (9) hanno peraltro mostrato che la regione di contatto è situata proprio davanti all'apice dell'intaglio iniziale e ciò ha suggerito un approccio basato sul principio di sovrapposizione per una valutazione approssimata dell'effetto dovuto al contatto stesso.

Una procedura iterativa è stata messa a punto in base alle seguenti ipotesi:

- il contatto tra le superfici della fessura può avvenire solamente nella zona adiacente l'apice dell'intaglio in modo che la sua estensione ' δ ' è caratterizzabile mediante il valore di una sola dimensione incognita: l'estensione stessa della zona di contatto (fig. 1b);
- lo sforzo di contatto è supposto essere uguale in modulo e di segno opposto al valore della tensione locale nominale.

Il problema è stato risolto iterativamente valutando il valore minimo di ' δ ' per il quale i lati della fessura risultano aperti nell'intera regione di non contatto ($v(x,a) \geq 0$ in $x \geq a_0 + \delta$) e K_{eff} è stato calcolato integrando la tensione nominale (residua + esterna) nel campo: $a_0 + \delta < x < a$.

ANALISI DEI RISULTATI E DISCUSSIONE

Sia il metodo delle WF che gli EF sono stati applicati per valutare la variazione dei valori effettivi del FIS in funzione del carico esterno applicato durante il ciclo di fatica. Le determinazioni numeriche sono state condotte per un certo numero di lunghezze di fessura che copre l'intero campo di interesse per le determinazioni sperimentali. Risultati tipici sono mostrati nella Fig. 8 per due lunghezze di fessura, mentre la parte bassa del ciclo di fatica è mostrata in maggior dettaglio in Fig. 9.

Per fessure relativamente corte (Fig. 8 e 9), entrambi i metodi portano a prevedere la completa chiusura in corrispondenza del valore più basso del carico applicato ($K_{ext}=0$). Aumentando il carico esterno, il valore della tensione nominale all'apice della fessura assume valori positivi e, di conseguenza, l'apice stesso si apre producendo un valore positivo del FIS effettivo. A questi livelli del carico esterno la fessura è parzialmente chiusa e, come conseguenza, il K_{eff} cresce molto più lentamente del K_{ext} . Per valori maggiori del carico applicato, si arriva al completo distacco delle superfici della fessura ($K_{ext}=K_{op}$), dopo di che le variazioni del valore effettivo del FIS diventano proporzionali a quelle del K_{ext} .

Per fessure di lunghezza maggiore (Fig. 8b), la completa chiusura non viene mai raggiunta. Ciò nonostante, per valori limitati del carico un fenomeno di parziale chiusura può comunque essere osservato. I valori sperimentali e teorici di K_{oD} sono confrontati nella figura 10, il significativo accordo costituisce una conferma delle possibilità di previsione che possono essere ottenute con le tecniche impiegate.

Gli andamenti calcolati per alcuni parametri di rilievo dal punto di vista della definizione dei cicli di fatica sono rappresentati nelle figure 11 e 12 in funzione della lunghezza di fessura. Si può osservare che il valore assoluto di K_{res} decresce monotonamente con il crescere della lunghezza di fessura e ciò è conseguenza del progressivo rilassamento delle tensioni residue a causa della separazione del corpo in due metà. Il valore di K_{eff}^{min} , che vale zero per piccole lunghezze di fessura, cresce fino a valori confrontabili a quelli di K_{ext}^{min} , mentre le condizioni di fessura completamente aperta al minimo carico non sono mai raggiunte nei presenti esperimenti.

Le figure 8 e 12 indicano chiaramente che i fenomeni di contatto tra le superfici inducono sensibili variazioni nel ciclo di K effettivamente applicato all'apice della fessura. Infatti, ΔK_{eff} è sensibilmente minore di ΔK_{ext} , in particolare per piccoli valori di 'a'. Per quanto riguarda il valore effettivo del rapporto R , esso appare affetto da variazioni di minore entità, e il suo valore varia tra 0 e 0.1. In Fig. 13 i valori misurati del FCGR nei provini saldati sono rappresentati in funzione sia della variazione del valore effettivo che del valore esterno del FIS, per confronto sono riportati anche i dati che si riferiscono al materiale base. Si può osservare come la considerazione delle tensioni residue possa giustificare gran parte delle differenze osservate nei due diversi tipi di provino. Le residue discrepanze presenti tra le due curve per bassi valori di ΔK possono essere in parte spiegate con il diverso valore di R_{eff} che vale 0 nel caso dei provini saldati e 0.1 nel caso del materiale base.

Dall'osservazione della figura 8 si può notare che, quando la fessura è parzialmente chiusa, il valore effettivo del FIS non subisce modifiche sostanziali al variare del carico esterno. Se si trascura questa variazione, il valore effettivo del 'range' di K durante il ciclo può essere espressa dalla differenza:

$$\Delta K_{eff} = K_{ext}^{max} - K_{oD} \quad (10)$$

Questa approssimazione può essere considerata valida in molti casi pratici e offre il vantaggio di una sensibile riduzione dell'onere di calcolo dato che il K_{oD} può essere valutato piuttosto semplicemente, senza considerare il fenomeno della richiusura, dalla condizione di annullamento del minimo valore della distanza relativa tra le due superfici di rottura. Inoltre, il K_{oD} può essere accuratamente valutato da semplici misure sperimentali.

Per quanto concerne i due metodi di analisi, sia il metodo delle Weight Function che il metodo degli Elementi Finiti si sono dimostrati strumenti utili alla previsione dei dati sperimentali ed è stato verificato un loro significativo accordo. La scelta tra uno dei due metodi nelle applicazioni è quindi principalmente un problema di tipo economico essendo entrambi soddisfacenti strumenti di analisi come sottolineato anche in [6].

CONCLUSIONI

Sono stati analizzati gli effetti delle tensioni residue sul fenomeno della propagazione di fessure per fatica ed è stato evidenziato l'effetto dovuto alla richiusura della fessura. I due strumenti di analisi impiegati, il metodo delle WF e degli EF, si sono dimostrati adatti ad interpretare i risultati ottenuti attraverso prove di fatica su provini CT con tensioni residue di saldatura.

Come risultato dell'analisi, è stata ottenuta una descrizione quantitativa della variazione di K_{eff} durante il ciclo di fatica ed è stato mostrato come questo parametro possa mostrare una dipendenza anche complessa dal carico applicato. L'analisi del problema ha fornito peraltro indicazioni su come si possa stimare approssimativamente la variazione di K_{eff} durante il ciclo sulla base di soli modelli lineari e avere risultati che possono essere con buona approssimazione impiegati in molti casi di pratico interesse.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G.A. Webster, Propagation of Fatigue Cracks Through Residual Stress Fields. Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Fatigue and Stress of Engineering Materials and Components, London, U.K., (1988).
- [2] S. Sirtori and L. Vergani, Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation. *Met.Sci. & Tech.* 6,2, 40-46 (1988).
- [3] A.P. Parker, Stress Intensity Factors, Crack Profiles, and Fatigue Crack Growth Rates in Residual Stress Fields. Residual Stress Effect in Fatigue, ASTM STP 776, 224-234, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, (1982). .pa
- [4] L. Bertini, A Quantitative Assessment of the Residual Stress Effects on Fatigue Crack Propagation in Air and Seawater. Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Fatigue and Stress of Engineering Materials and Components, London, U.K., (1988).
- [5] L. Bertini, Corrosion-Fatigue Crack Growth Rate in a C-Mn Steel and in its Welded Joints in Seawater. Proceedings of the Int. Conf. on Environment-Assisted Fatigue, Sheffield, U.K., (1988).
- [6] M. Beghini and L. Bertini, Analytical and Numerical Evaluation of the Residual Stress Effects on Fatigue Crack Propagation, Proc. 4th Int. Conf. on Computational Methods and Experimental Measurements, Computational Mechanics Pub., Southampton (1989).
- [7] D. J. Cartwright, Stress Intensity Factor Determination. Chapter 2, Developments in Fracture Mechanics, (Ed. G.G. Chell), Vol. 1, 29-66, Applied Science Publishers Ltd, London, (1980).
- [8] M.D. Heaton, On the Calculation of Stress Intensity Factors due to Thermal and Residual Stress Fields. Research Report NW/SSD/RR/158/76, CELB North Western Region (1976).
- [9] R.C. Labbens, J. Heliot, A. Pellissier-Tanon, Weight Functions for Three-Dimensional Symmetrical Crack Problems. Crack and Fracture, ASTM STP 601, 448-470, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1976).

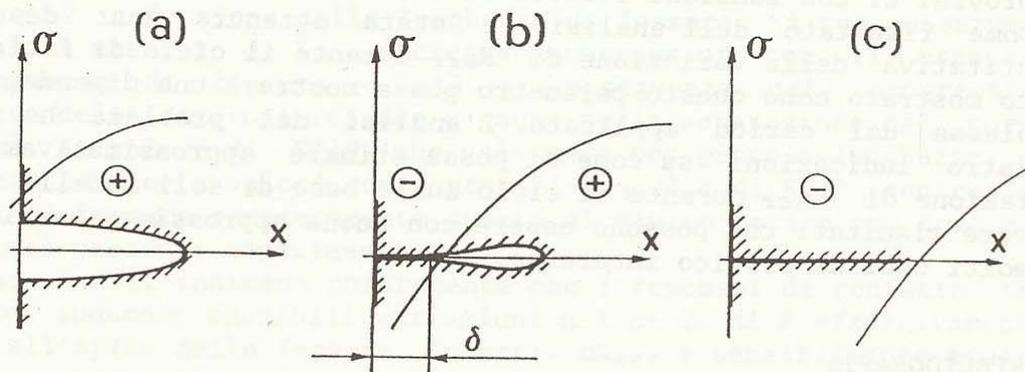


Fig. 1 - Possibili diversi profili di fessura.

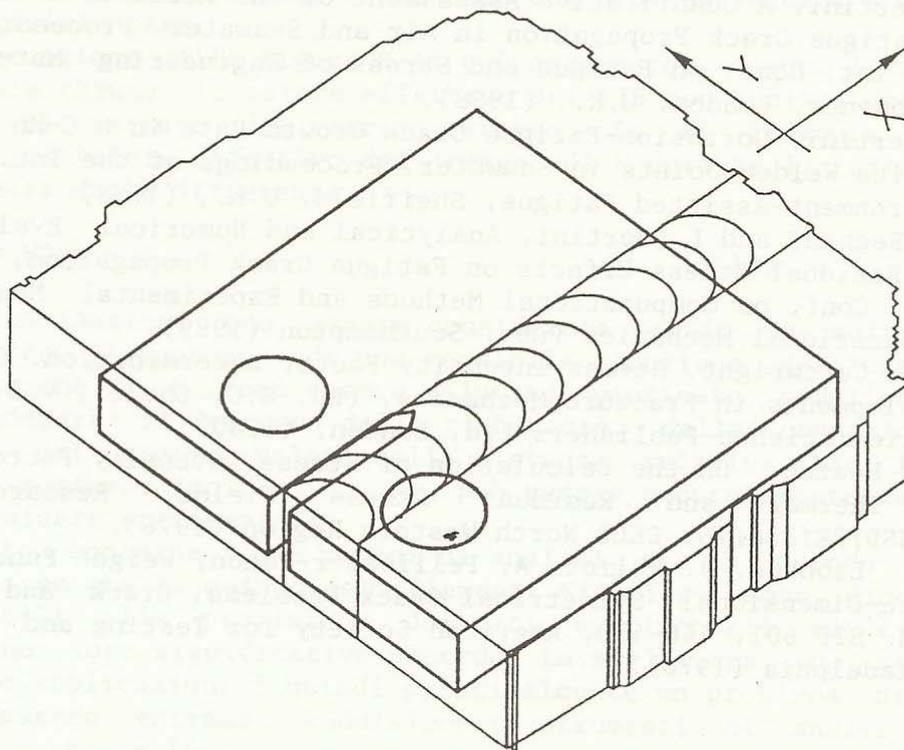


Fig. 2 - Provino CT ottenuto da lamiera saldata.

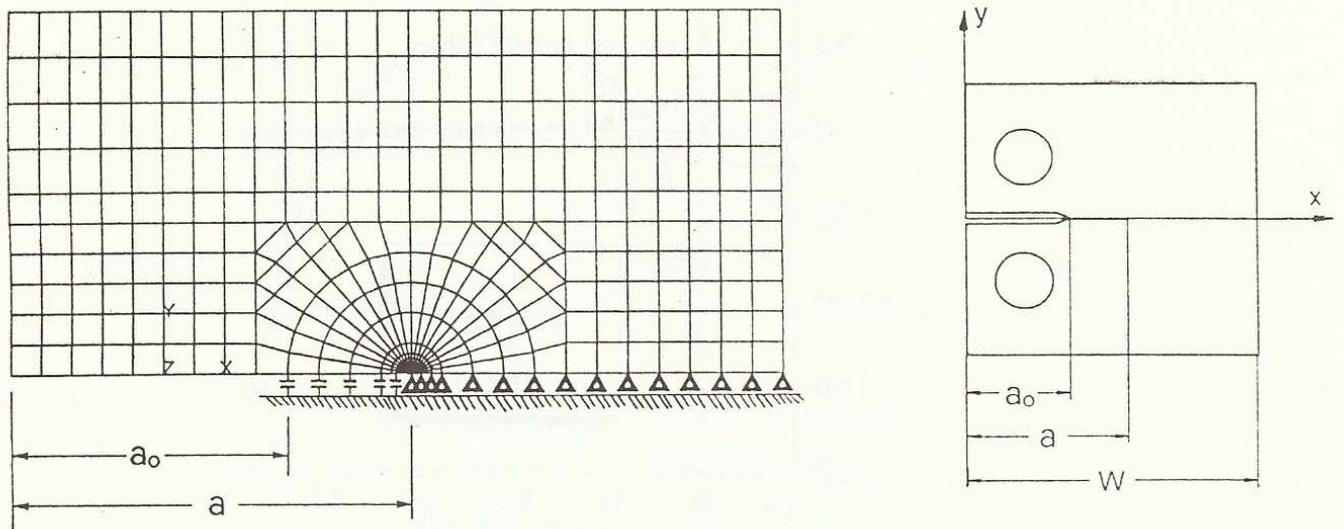


Fig. 5 - Modello agli Elementi Finiti del provino Compact Tension.

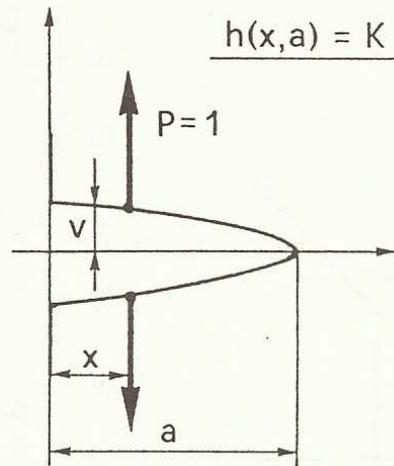


Fig. 6 - Schema di applicazione delle forze unitarie per la individuazione delle Weight Function.

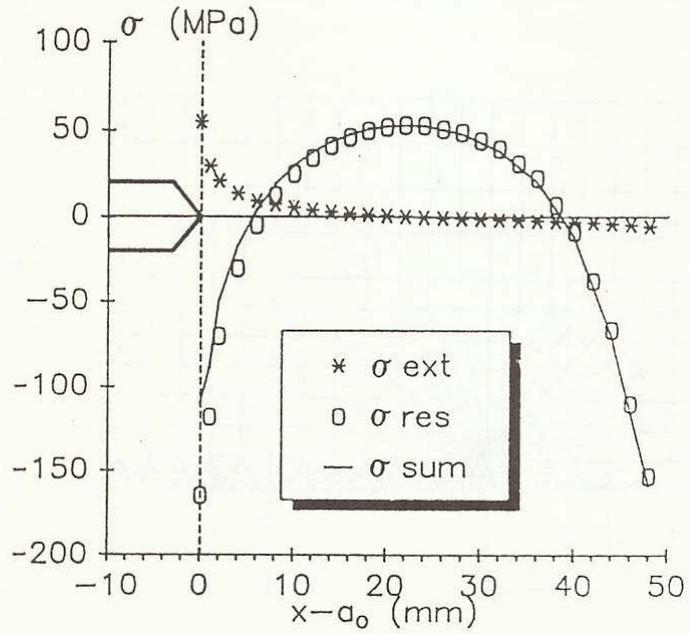


Fig. 7 - Tensioni nominali residue e esterne in corrispondenza del valore minimo del carico sul 'ligament' del provino.

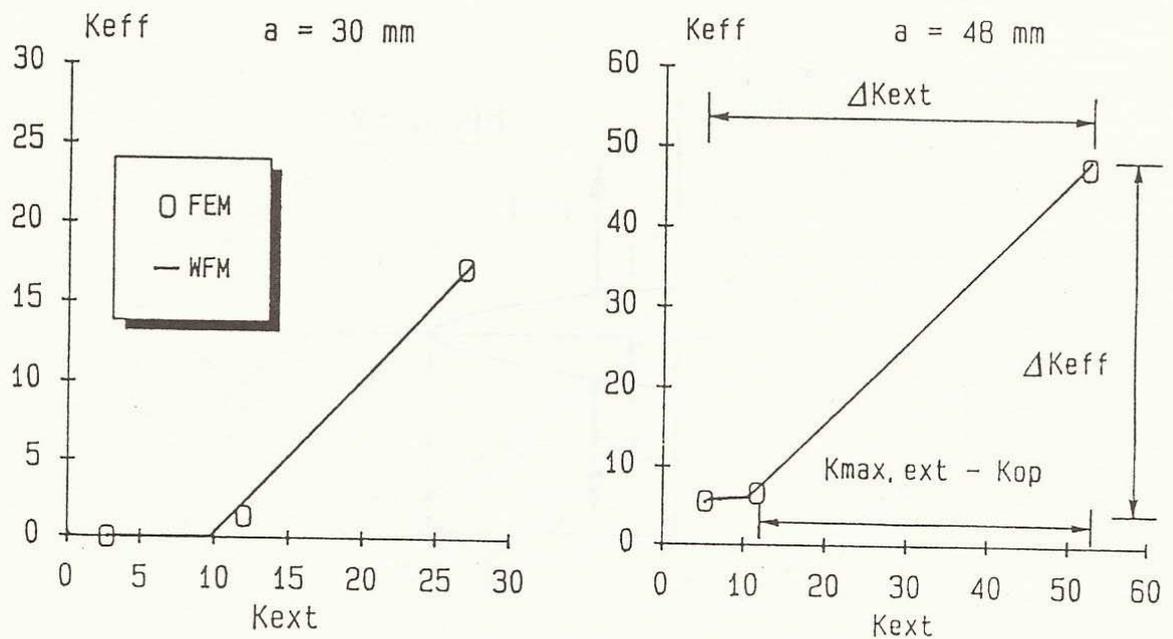


Fig. 8 - K_{eff} in funzione di K_{ext} (MPa/m) per due distinti valori di lunghezza di fessura.

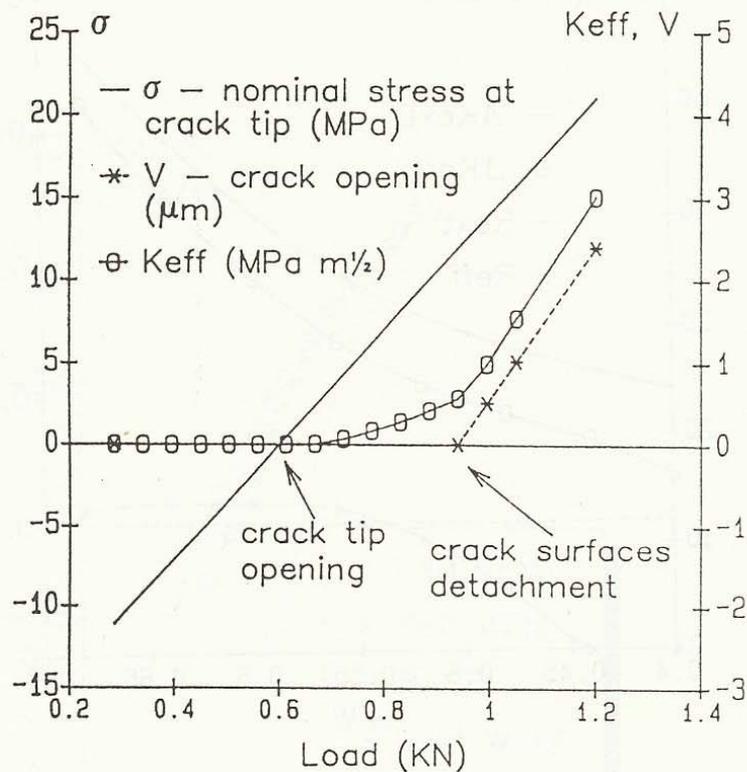


Fig. 9 - Variazione della tensione nominale all'apice della fessura e del K_{eff} al variare del carico per una fessura di 32 mm; la linea tratteggiata mostra lo spostamento relativo delle superfici della fessura per $x=a_0$.

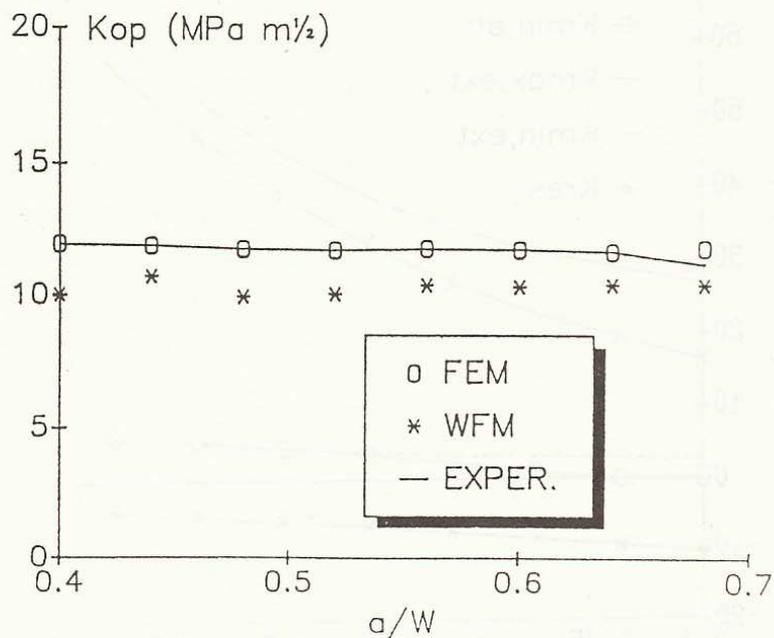


Fig. 10 - K_{0P} in funzione della lunghezza di fessura.

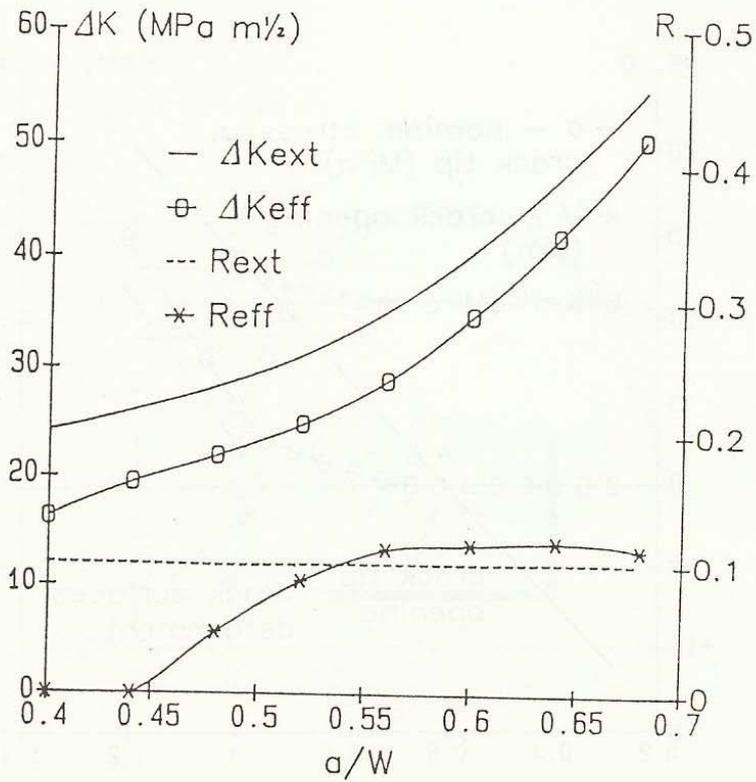


Fig. 11 - Variazione dei parametri rilevanti per la propagazione di fatica in funzione della lunghezza di fessura.

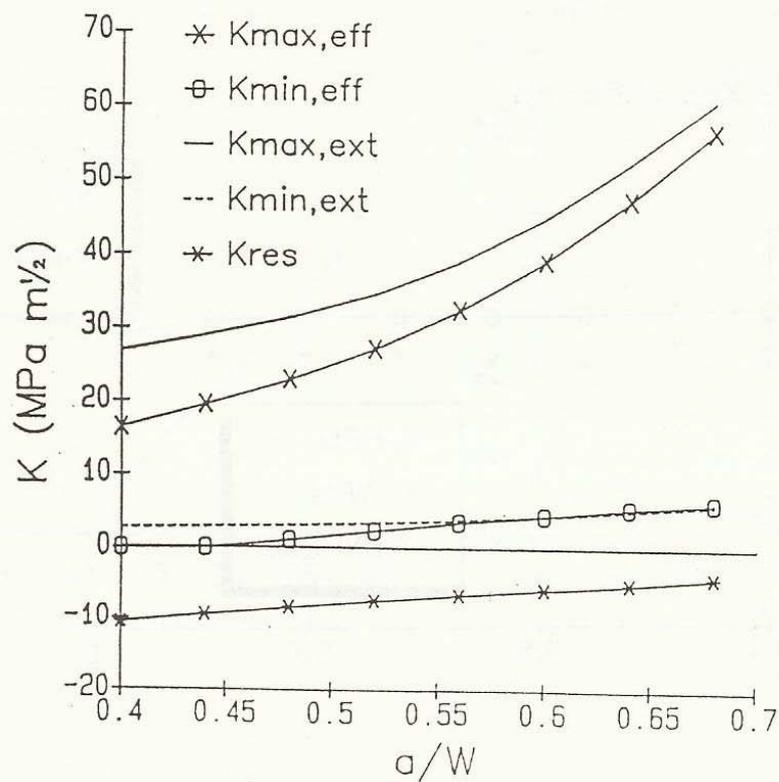


Fig. 12 - Confronto tra valori esterni e effettivi di ΔK e del rapporto R .

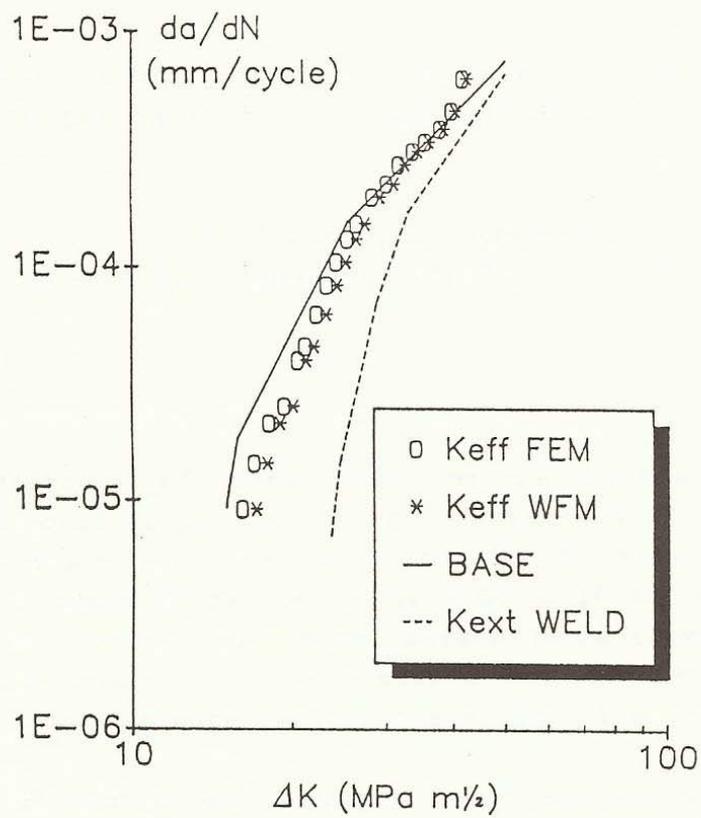


Fig. 13 - FCGR in funzione dei valori esterni ed effettivi della variazione del FIS.