

EFFETTO DELLE TENSIONI RESIDUE
SULLA PROPAGAZIONE PER FATICA DI DIFETTI
IN GIUNTI DI ALLUMINIO SALDATI AL PLASMA

A. Lanciotti, L. Lazzeri

Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale
Università degli Studi di Pisa
Via Diotisalvi, 2
56126 Pisa

SOMMARIO

Il lavoro presenta i principali risultati di un programma di ricerca condotto presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale di Pisa, in collaborazione con Alenia - Gruppo Sistemi Spaziali, per la valutazione di alcune proprietà di Meccanica della Frattura di giunti saldati al plasma in lega di alluminio 2219-T8.

Il programma delle prove comprendeva prove statiche, per la caratterizzazione del materiale del cordone, e prove di propagazione per fatica di difetti, a partire da un intaglio superficiale, lungo il cordone ed in direzione trasversale ad esso. Le prove, condotte con carico di tipo sinusoidale, con diversi valori di R, hanno evidenziato una velocità di propagazione della fessura molto maggiore in direzione ortogonale al cordone che lungo il cordone stesso. Sono state misurate le tensioni residue nelle piastre saldate per mezzo di estensimetri, attraverso il sezionamento delle piastre stesse; i risultati ottenuti mostrano che la loro entità è significativa ed il loro effetto sulla propagazione considerevole.

1. INTRODUZIONE

La saldatura ad arco è una tecnologia di giunzione molto interessante per strutture aerospaziali, particolarmente nel caso di veicoli spaziali abitati e pressurizzati o per serbatoi. In tempi recenti, tale tecnologia ha conseguito dei notevoli miglioramenti, con conseguente riduzione dei difetti generalmente associati ad essa, cioè modifica delle proprietà meccaniche dei materiali, difettosità e tensioni residue.

Presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale dell'Università di Pisa è iniziata una attività di ricerca, in collaborazione con Alenia - Gruppo Sistemi Spaziali, sulla valutazione di alcune proprietà di Meccanica della Frattura di giunzioni saldate in lega di alluminio 2219-T8. Tale ricerca riguarda le due tecniche principali di saldatura all'arco, TIG (Tungsten Inert Gas) e PAW (Plasma Arc Welding). Alcuni aspetti relativi al processo TIG sono stati

presentati in /1/; il presente lavoro discute alcuni risultati di propagazione e di distribuzione di tensione residue in giunti saldati al plasma.

Il materiale utilizzato, lega di alluminio 2219-T8 dello spessore di 7 mm, saldato al plasma, è stato fornito da Alenia - Gruppo Sistemi Spaziali, nella forma di piastre di dimensioni 200X700 mm, con saldatura longitudinale, e di piastre 190x520 mm, con saldatura trasversale. Tutte le piastre erano state ispezionate con raggi X ed erano risultate prive di difetti.

Il programma della ricerca comprende sia prove di tipo statico, per valutare le caratteristiche meccaniche del materiale del cordone, sia di propagazione, con difetto iniziale superficiale posto sia ortogonalmente alla saldatura che parallelamente. Allo scopo di chiarire il ruolo delle tensioni residue sulla propagazione dei difetti, si è valutata la loro distribuzione per mezzo di una tecnica distruttiva: l'uso di estensimetri per misurare le deformazioni rilasciate, con il progressivo taglio del pezzo con macchina utensile.

2. PROVE STATICHE

Il cordone di saldatura era largo circa 10 mm; è stato quindi possibile ricavare dei provini per prove di tipo statico, con la sezione di prova completamente ricavata all'interno del cordone. In totale sono stati preparati sette provini, e per confronto si sono ricavati altri tre provini dal materiale vergine, a sufficiente distanza dal cordone.

I risultati ottenuti mostrano una marcata riduzione della tensione di snervamento (0.2% di deformazione permanente) e di quella di rottura nel materiale del cordone (valori medi rispettivamente pari a 124 e 250 MPa), rispetto ai dati del materiale base (338 e 453 MPa, rispettivamente). Il modulo elastico è marginalmente influenzato dal processo di saldatura, passando da 70800 MPa per il materiale vergine a 63511 MPa per il cordone.

Un'altra informazione importante riguarda l'estensione della zona termicamente alterata: a tale scopo è stato deciso di effettuare alcune misure di durezza, seguendo la stessa tecnica esposta in /2/. I risultati di queste misure, durezza Rockwell C (sotto un carico di 61.35 N) in funzione della distanza dall'asse del cordone, sono riportate in fig. 1. La zona termicamente alterata si estende fino a 20-25 mm dall'asse del cordone, circa quattro/cinque volte più larga del cordone stesso, più di quanto si potesse supporre intuitivamente. Risultati paragonabili, relativi alla lega di alluminio 6082-T6, saldata MIG (Metal Inert Gas) e plasma-MIG, sono riportati in /2/.

3. PROVE DI PROPAGAZIONE DI DIFETTI

3.1 Dettagli sperimentali

3.1.1 Provini. Sono state condotte prove di propagazione su provini contenenti un difetto artificiale non-passante; tale difetto è infatti da ritenersi tipico per una piastra di spessore relativamente alto, poiché fessure passanti in strutture di alto spessore sono certamente individuate e riparate. Per quanto riguarda il loro orientamento, sono state analizzate entrambe le direzioni rispetto al cordone, longitudinale e trasversale; nel primo caso il difetto è stato introdotto al piede del cordone, come mostrato in fig. 2. A tale scopo si è utilizzata

una fresa, 25 mm di diametro e 0.3 mm di spessore; la profondità dell'intaglio ("c" nella fig. 2) era di circa 2 mm, a cui corrispondeva un rapporto di forma c/a di circa 0.3.

3.1.2 Sequenza di carico. Le prove sono state condotte su una macchina di fatica servo-idraulica della capacità di 250 KN. Si è utilizzato un carico ad ampiezza costante e due valori del rapporto tra le tensioni, $R (=S_{min}/S_{max})$, pari a 0.1 e 0.5. Le prove con $R=0.1$ sono state condotte con una tensione massima di 80 MPa, mentre per quelle con $R=0.5$ è stato necessario aumentare tale tensione a 90 MPa, a causa delle basse velocità di accrescimento.

Per osservare l'evoluzione della forma del difetto anche quando esso non è ancora passante, si è adottata una tecnica di carichi di marcatura, inserendo nella sequenza di fatica dei blocchi di cicli di piccola escursione ($R=0.9$), con lo stesso carico massimo. Con tale tecnica, /3/, si produce una modifica nella superficie di frattura, senza alterare il processo di propagazione: le zone plastiche rimangono immutate e la fessura sostanzialmente non propaga, poiché i ΔK applicati sono inferiori al valore di soglia. Il numero di cicli di marcatura applicati in ciascun blocco (50mila) è stato deciso sulla base dei risultati riportati in /4/, ove un problema analogo è affrontato per un'altra lega di alluminio. Sfortunatamente, tale procedura non si è dimostrata efficace per la lega in esame: le posizioni successive del fronte di frattura non erano ben evidenti all'osservazione con microscopio ottico, particolarmente per fessure piccole. Un consistente miglioramento si è ottenuto applicando, durante l'esecuzione dei cicli di marcatura, un liquido penetrante colorato per controlli non-distruttivi. Prima dell'applicazione dei successivi cicli di fatica, si provvedeva all'essiccazione del liquido con aria calda. Tale procedura, sebbene piuttosto laboriosa, ha consentito di ottenere buoni risultati, specialmente per difetti nel cordone.

3.1.3 Misure del difetto. Durante la prova, la dimensione esterna del difetto ("a" in fig. 2) veniva misurata mediante un microscopio ottico a 20 ingrandimenti, scorrevole su barra rettificata dotata di nonio decimale. Al termine della prova, si sono osservate le superfici di frattura mediante un microscopio stereo (20+100 X) e per mezzo di una tavola a croce si sono misurate le successive coppie di valori, "a" e "c".

3.2 Risultati delle prove di propagazione

3.2.1 Propagazione del difetto. I risultati delle prove di propagazione sono stati esaminati in termini di velocità di crescita, da/dN , in funzione di ΔK , variazione del fattore di intensità degli sforzi. Per valutare K per una fessura superficiale semi-ellittica, si è fatto ricorso alla soluzione riportata in /5/, ricavata sulla base di calcoli agli elementi finiti, mentre per la fessura passante si è adottata l'espressione $K = \beta \sigma \sqrt{\pi a}$, essendo β il fattore di correzione per la larghezza finita. Per la fase di transizione successiva allo sfondamento dello spessore da parte del difetto superficiale e fino alla condizione di fessura passante con fianchi dritti, non sono disponibili in letteratura espressioni per K ; seguendo le indicazioni espresse in /6/, si è ipotizzato un cambiamento repentino del fronte, nell'arco di pochi cicli di carico. I risultati, illustrati in fig. 3, sono caratterizzati da una bassa dispersione, con l'unica eccezione di qualche dato isolato. La fig. 3 mostra anche il confronto con dei dati precedenti, sullo stesso materiale ma con saldatura TIG (difetto longitudinale, $R=0.1$); si osserva che il materiale saldato al plasma ha una velocità di propagazione più bassa, probabilmente per

effetto di minori tensioni residue conseguenti al processo, come sarà discusso nel paragrafo seguente.

I risultati sono distinti per orientamento ("T" per trasversale rispetto al cordone, "L" per longitudinale) e per valore di R. La velocità di propagazione ovviamente aumenta con R ed, a parità di ΔK , è minore lungo il cordone che non trasversalmente ad esso. Nel primo caso il difetto propaga sempre nel materiale del cordone, mentre nel secondo caso essa interessa dapprima la zona termicamente alterata e poi il materiale vergine; ci si sarebbe aspettato un comportamento opposto. La spiegazione molto probabilmente risiede nelle tensioni residue, introdotte nel pezzo dal processo: tensioni di trazione notevoli agiscono nella direzione parallela al cordone, condizionando quindi in modo sensibile la propagazione nella direzione trasversale. Una misura di tali tensioni ed una discussione del loro effetto sulla propagazione saranno effettuate nei paragrafi 4 e 5.

3.2.2 Evoluzione della forma del difetto. Il difetto iniziale ha un rapporto di forma $c/a \cong 0.3$; tale rapporto cresce durante la prova, tendendo ad un valore costante, pari a 0.75-0.80. La stessa tendenza era stata osservata anche da altri autori, v. ad es. /4,7/. I risultati mostrati in tali riferimenti bibliografici sono affetti da una minore dispersione, ma essi si riferiscono a studi relativi a materiale vergine, mentre la saldatura evidentemente aggiunge una ulteriore fonte di dispersione.

4. TENSIONI RESIDUE IN GIUNTI SALDATI

4.1 La formazione di tensioni residue in giunti saldati

Nel caso di strutture saldate, tensioni residue significative si formano in conseguenza del riscaldamento localizzato e del successivo raffreddamento; esse costituiscono uno dei principali problemi connessi con le giunzioni saldate. Il meccanismo di formazione delle tensioni residue può essere spiegato con modelli semplici, /8/, i quali danno giustificazione della formazione di tensioni residue basandosi sul fatto che la congruenza dei pezzi da saldare ed il cordone avviene in condizioni diverse di temperatura; il successivo raffreddamento induce un sistema auto-equilibrato di tensioni, di trazione sul cordone e di compressione sulle piastre.

Un'analisi esauriente dei fattori che influenzano la grandezza e la distribuzione delle tensioni residue in giunti saldati è riportata in /9/, mentre una discussione delle diverse distribuzioni di tensioni longitudinali nei vari materiali di impiego ingegneristico si trova in /10/.

Per quanto riguarda le tensioni trasversali, la loro distribuzione è caratterizzata da valori massimi pari al 10-20% della massima tensione longitudinale, mentre alle estremità delle piastre si hanno tensioni di compressione.

Ovviamente, anche le dimensioni dell'elemento saldato influenzano l'entità delle tensioni residue: per effettuare misure significative, le piastre devono essere sufficientemente grandi, in modo da consentire la formazione di un campo completo di tensioni residue.

4.2 Valutazione delle tensioni residue in giunti saldati

Una descrizione esauriente delle varie tecniche per la valutazione delle tensioni residue nei giunti saldati si trova in /9/, /10/ e /11/; non è interesse specifico di questo lavoro discutere

le problematiche connesse con tali tecniche. Per ragioni di semplicità, nella presente indagine si è fatto uso di una tecnica distruttiva basata sull'impiego di estensimetri, incollati sulle piastre, andando a misurare il rilassamento delle tensioni in conseguenza dell'esecuzione di un taglio di lunghezza progressivamente crescente.

4.3 Descrizione dell'attività sperimentale e dei risultati

Quattro provini (RS1, RS2, RS3 e RS4) sono stati strumentati con estensimetri e dissezionati, per quantificare lo stato di tensioni residue prodotto dal processo di saldatura. La fig. 4 mostra una tipica mappa degli estensimetri, composta da 21 estensimetri, con larghezza della griglia di 1.5 mm. I numeri tra parentesi si riferiscono ad estensimetri montati sulla faccia opposta del provino. Si è assunto che la distribuzione della deformazione fosse simmetrica rispetto al cordone, per cui si è provveduto a strumentare in modo maggiore solo una delle metà del provino. Per ridurre il numero totale di estensimetri, ma anche per ridurre la loro distanza relativa in prossimità del cordone, si è deciso di utilizzare estensimetri a singola griglia, incollati in direzione longitudinale.

Come sottolineato nel paragrafo precedente, il valore di picco delle tensioni trasversali è decisamente minore di quello delle tensioni longitudinali; si è pertanto deciso di procedere alla stima delle sole tensioni longitudinali, che del resto sono le più significative per gli scopi del presente lavoro.

I risultati delle misure effettuate hanno fornito suggerimenti per una attività futura: le deformazioni relative ad estensimetri contrapposti sono molto simili, per cui un possibile modo di migliorare la precisione nei risultati, prendendo anche in considerazione le deformazioni trasversali, è quello di incollare sul retro del provino estensimetri nella direzione trasversale, in modo da caratterizzare completamente lo stato di deformazione, senza raddoppiare il numero di estensimetri. La simmetria dello stato di deformazione non era così ovvia, poiché il processo di saldatura avviene da una parte sola e bisognava quindi verificare se lo spessore fosse sufficientemente piccolo da non indurre asimmetrie.

Per misurare le tensioni residue, i provini strumentati sono stati posizionati sul banco di una fresatrice, in modo tale da consentire deformazioni libere nel proprio piano ed evitando attentamente di introdurre flessione nel bloccaggio. La dissezione ha avuto inizio da un foro, di diametro 4 mm, al centro del cordone, che è stato progressivamente allungato ad asola nella direzione trasversale a piccoli incrementi, simulando il processo di crescita della fessura nel provino di fatica. Ad ogni incremento, venivano effettuate le misure estensimetriche, fino alla dissezione totale. Per quanto riguarda lo schema di dissezione, ci sono diverse possibilità; lo schema utilizzato è interessante, poiché simula la crescita di una cricca per fatica e consente di ottenere la distribuzione delle tensioni residue in funzione della lunghezza di fessura. Le tensioni longitudinali sono interamente rilassate, ma la misura della deformazione longitudinale tiene anche in considerazione il parziale rilassamento delle tensioni trasversali (il rilassamento completo delle tensioni trasversali è ottenibile con un secondo taglio, a monte della linea degli estensimetri); per questo motivo, i risultati delle tensioni longitudinali sono affetti da un errore non valutabile ma, come spiegato in precedenza, di entità piccola, poiché le tensioni trasversali sono minori di quelle longitudinali.

Tutti i dati relativi al provino RS1 sono riportati e discussi in /12/; per brevità, si riportano in fig. 5 le distribuzioni misurate dopo il taglio completo dei quattro provini.

Le distribuzioni di tensioni residue nei quattro provini mostrano caratteristiche analoghe, pur con qualche differenza. La deformazione massima nel cordone è di circa 800-1000 $\mu\epsilon$, mentre si raggiunge un valore massimo di circa 1100-1500 $\mu\epsilon$ nella zona termicamente alterata. Nella parte destra del grafico ci si attendeva una diminuzione a zero della deformazione, mentre invece sono ancora presenti piccole deformazioni. La zona affetta da deformazioni residue è più grande del prevedibile e quindi sarebbero raccomandabili piastre di dimensioni maggiori per questo tipo di misure.

La fig. 6 mostra l'evoluzione delle deformazioni residue durante il sezionamento del provino RS1; la deformazione massima è al centro del cordone per semi-lunghezze di taglio fino a 7 mm, mentre per valori superiori, la deformazione massima è posta a circa 15 mm dall'asse del cordone. Aumentando ulteriormente la lunghezza del taglio, non si osservano modifiche apprezzabili nella distribuzione delle deformazioni di trazione, mentre avviene una progressiva modifica della parte di compressione. Per una semi-lunghezza del taglio di 42 mm, si raggiunge una distribuzione stabile, che corrisponde al completo rilascio delle deformazioni interne; cambiata di segno, questa fornisce la distribuzione delle deformazioni residue nel provino integro. L'evoluzione delle deformazioni residue in funzione della semi-lunghezza di fessura può ottenersi da questa per sottrazione da questa delle distribuzioni relative alle varie lunghezze di taglio, assumendo valida l'ipotesi di comportamento lineare del materiale. A questo punto, avendo supposto trascurabili le tensioni trasversali, si possono ricavare le tensioni residue semplicemente moltiplicando le deformazioni per il modulo di elasticità. Tali risultati sono riportati in fig. 7; in particolare, la fig. 7a mostra la distribuzione delle tensioni residue longitudinali nel provino integro, mentre la fig. 7b riporta la sua evoluzione per quattro diverse lunghezze di fessura, da 4 a 20 mm. Le tensioni residue diminuiscono rapidamente per semi-lunghezze di fessura maggiori di 20 mm, mentre per lunghezze minori è presente all'apice della fessura una tensione residua di trazione dell'ordine di 70+100 MPa.

5. EFFETTI DEL CAMPO DI TENSIONI RESIDUE SULLA PROPAGAZIONE DEI DIFETTI

Le prove di propagazione di difetti, descritte nel paragrafo 3, sono state condotte con due diverse condizioni di carico: $S_{max}=80$ MPa, $R=0.1$ e $S_{max}=90$ MPa, $R=0.5$. I valori dei rapporti tra le tensioni si riferiscono ovviamente alla condizione di carico esterno applicato, che però viene modificato localmente dalla presenza di tensioni residue. Questo effetto è illustrato in fig. 8, che mostra, con i dati del provino RS1, l'andamento del valore effettivo di R con la lunghezza di fessura. Tale valore è maggiore del nominale e cambia durante la prova fino ad una lunghezza di fessura di circa 40 mm, dopo di che il campo di tensioni residue scompare, mentre importanti tensioni residue sono presenti per cricche nell'intervallo 20-30 mm; tale intervallo è di grande interesse, perché corrisponde quasi all'intera vita della struttura, essendo molto limitata la vita residua in presenza di cricche maggiori.

L'effetto delle tensioni residue sulla propagazione può essere valutato per mezzo di alcuni semplici calcoli. Limitando l'attenzione a lunghezze di fessura fino a 20 mm, la fig. 8 mostra una variazione di R_{eff} piuttosto piccola, per cui si può assumere un valore costante pari a 0.56 per l'analisi delle prove condotte con $R=0.1$ e $S_{max}=80$ MPa. Con la stessa procedura, si può assumere per le prove condotte con $S_{max}=90$ MPa e $R=0.5$ un valore

costante di R_{eff} pari a 0.76. Utilizzando i risultati delle altre prove (RS2, RS3 e RS4) si ottengono valori paragonabili, per cui nei calcoli seguenti si useranno i dati della prova RS1.

Per tenere in conto l'effetto della variazione di R sulla propagazione si è fatto uso della legge di Walker, /13/:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m (1 - R)^p$$

Utilizzando i dati dalle prove con $R_{eff}=0.56$ e $R_{eff}=0.76$, si possono valutare i parametri C, m e p della legge di Walker per mezzo del metodo dei minimi quadrati, ottenendo l'espressione:

$$\frac{da}{dN} = 8.456 \cdot 10^{-9} (\Delta K)^{3.4267} (1 - R)^{-1.684}$$

essendo le unità: da/dN (mm/ciclo) e ΔK (MPa \sqrt{m}).

Questa espressione è stata utilizzata per determinare la curva di propagazione della fessura relativa ad un valore effettivo di R pari a 0.1; questa curva è confrontata in fig. 9 con le due curve relative a valori nominali di R pari a 0.1 e 0.5, cui corrispondono rispettivamente valori $R_{eff}=0.56$ e $R_{eff}=0.76$. Esiste una notevole differenza tra le due curve con $R_{nom}=0.1$ e $R_{eff}=0.1$; per quantificare tale differenza, si è simulata la propagazione di una fessura passante da $a_0=10$ mm a $a_f=20$ mm, con $S_{max}=80$ MPa; i risultati, riportati in fig. 10, mostrano quanto profondamente sia influenzata la propagazione, che può risultare più breve di parecchie volte rispetto al caso di assenza di tensioni residue.

6. CONCLUSIONI

Sono stati illustrati i principali risultati di un programma di ricerca condotto presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale di Pisa, in collaborazione con Alenia - Gruppo Sistemi Spaziali, per la valutazione di alcune proprietà di Meccanica della Frattura di giunzioni saldate al plasma in lega di alluminio 2219-T8.

Prove statiche preliminari hanno mostrato una notevole riduzione della resistenza (tensioni di snervamento e rottura) rispetto al materiale vergine, mentre il modulo elastico risulta solo leggermente diminuito dal processo della saldatura. L'estensione della zona termicamente alterata è stata valutata con misure di micro-durezza ed è stata riscontrata una grandezza pari a 4+5 volte la larghezza del cordone.

Sono state effettuate prove di propagazione di difetti con diversi valori di R; il difetto iniziale, non-passante, di 2 mm di profondità, è stato introdotto sia lungo il cordone che trasversalmente ad esso. Per consentire l'analisi dell'evoluzione dei difetti nello spessore, si sono introdotti nella sequenza di carico dei blocchi di marcatura, costituiti da blocchi di numerosi cicli di piccola ampiezza ed elevato valore medio ($R=0.9$).

Le velocità di propagazione perpendicolarmente al cordone sono molto più elevate che non lungo il cordone, anche se in quest'ultimo caso il difetto si propaga sempre nella zona termicamente alterata, mentre nel primo caso esso interessa poi anche il materiale vergine. Questo fatto è stato attribuito alla presenza di consistenti tensioni residue di trazione.

Quattro provini sono stati strumentati con circa 20 estensimetri e poi dissezionati per quantificare le tensioni residue introdotte dal processo di saldatura. Sono stati utilizzati solo

estensimetri a singola griglia, in modo da poterli posizionare il più fitto possibile in prossimità del cordone. Le prove hanno fornito indicazioni per attività future: un possibile modo per migliorare la precisione dei risultati consiste nell'incollare estensimetri anche sul retro, ma con griglia trasversale, in modo da caratterizzare completamente lo stato di tensione. La deformazione massima nel cordone era nell'intervallo 800-1000 $\mu\epsilon$, mentre un valore massimo di 1100-1500 $\mu\epsilon$ si raggiunge nella zona termicamente alterata; le tensioni corrispondenti sono di circa 60-100 MPa. Le tensioni residue decadono rapidamente per lunghezze di fessura maggiori di 20 mm.

Un semplice calcolo ha mostrato che le tensioni residue influenzano molto la durata della propagazione; quindi, anche da questo punto di vista, l'ottimizzazione del processo di saldatura e l'analisi di possibili trattamenti termici per ridurre le tensioni residue nella struttura rivestono particolare importanza.

7. BIBLIOGRAFIA

- /1/ A. Lanciotti, L. Lazzeri: "Fracture Mechanics Properties of Aluminium Welded Joints", Department of Aerospace Engineering, University of Pisa, ADIA 93-6, June 1993.
- /2/ O. Grong, O.R. Myhr: "Modelling of the Strength Distribution in the Heat Affected Zone of 6082-T6 Aluminium Weldments", in "Mathematical Modelling of Weld Phenomena", pp. 300-311, The Institute of Materials, London 1993.
- /3/ Anon. "Fatigue Crack Topography", Session II: "Methods and Means of Crack Front Marking", AGARD CP 376, November 1984.
- /4/ I.S. Putra, J. Schijve: "Crack Opening Stress Measurements of Surface Cracks in 7075-T6 Al Alloy Plate Specimens through Electron Fractography", Report LR-641, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, August 1990.
- /5/ J.C. Newman, I.S. Raju: "Stress-Intensity Factor Equation for Crack in Three-Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads", Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium, Vol.1: Theory and Analysis, ASTM STP 791, pp.238-265.
- /6/ D. Broek: "The Practical Use of Fracture Mechanics", Kluwer Academic Publ., 1988.
- /7/ O. Vosikovskiy, A. Rivard: "Growth of Surface Fatigue Cracks in a Steel Plate", International Journal of Fatigue, July 1981, pp. 111-115.
- /8/ T.R. Gurney: "Fatigue of Welded Structures", Cambridge Univ. Press, London 1979.
- /9/ K. Masubuchi: "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press Ltd, 1980.
- /10/ D. Radau: "Heat Effects of Welding", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992.
- /11/ L. Mordfin: "Measurement of Residual Stresses: Problems and Opportunities", in Conference Proceedings of "Residual Stress for Designers and Metallurgists", Chicago, April 1980.
- /12/ A. Lanciotti, L. Lazzeri: "Fracture Mechanics Properties and Residual Stresses in Aluminium Plasma Welded Joints", Department of Aerospace Engineering, University of Pisa, ADIA 94-1, April 1994.
- /13/ K. Walker: "The Effect of Stress Ratio during Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum", in "Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life", ASTM STP 462, pp. 1-14, 1970.

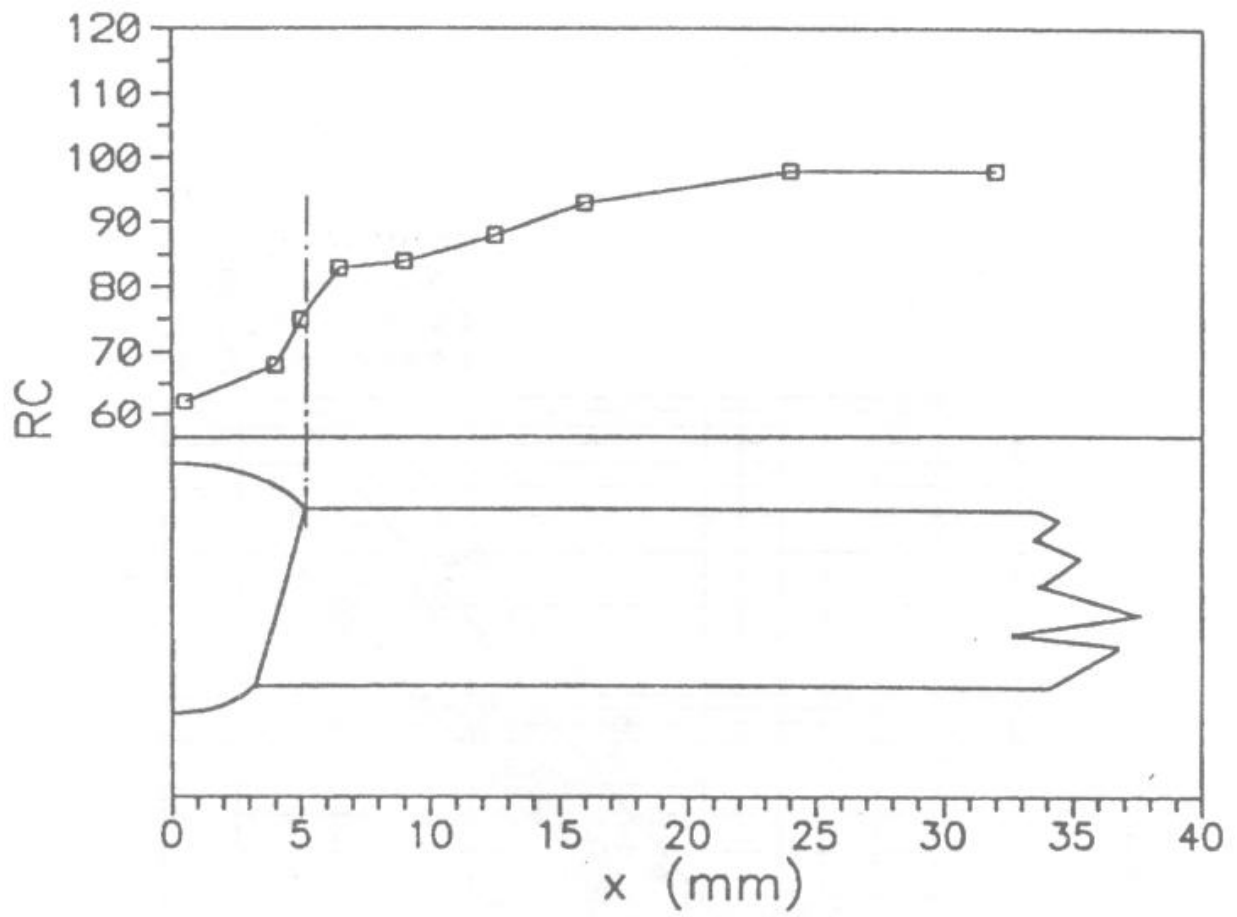


Fig.1 - Durezze Rockwell del materiale saldato in funzione della distanza dall'asse del cordone.

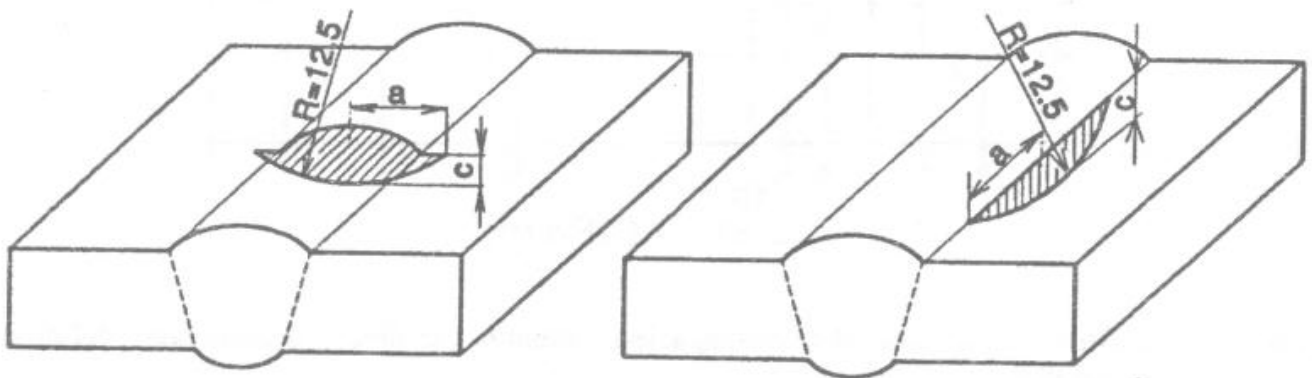


Fig. 2 - Posizione dei difetti iniziali.

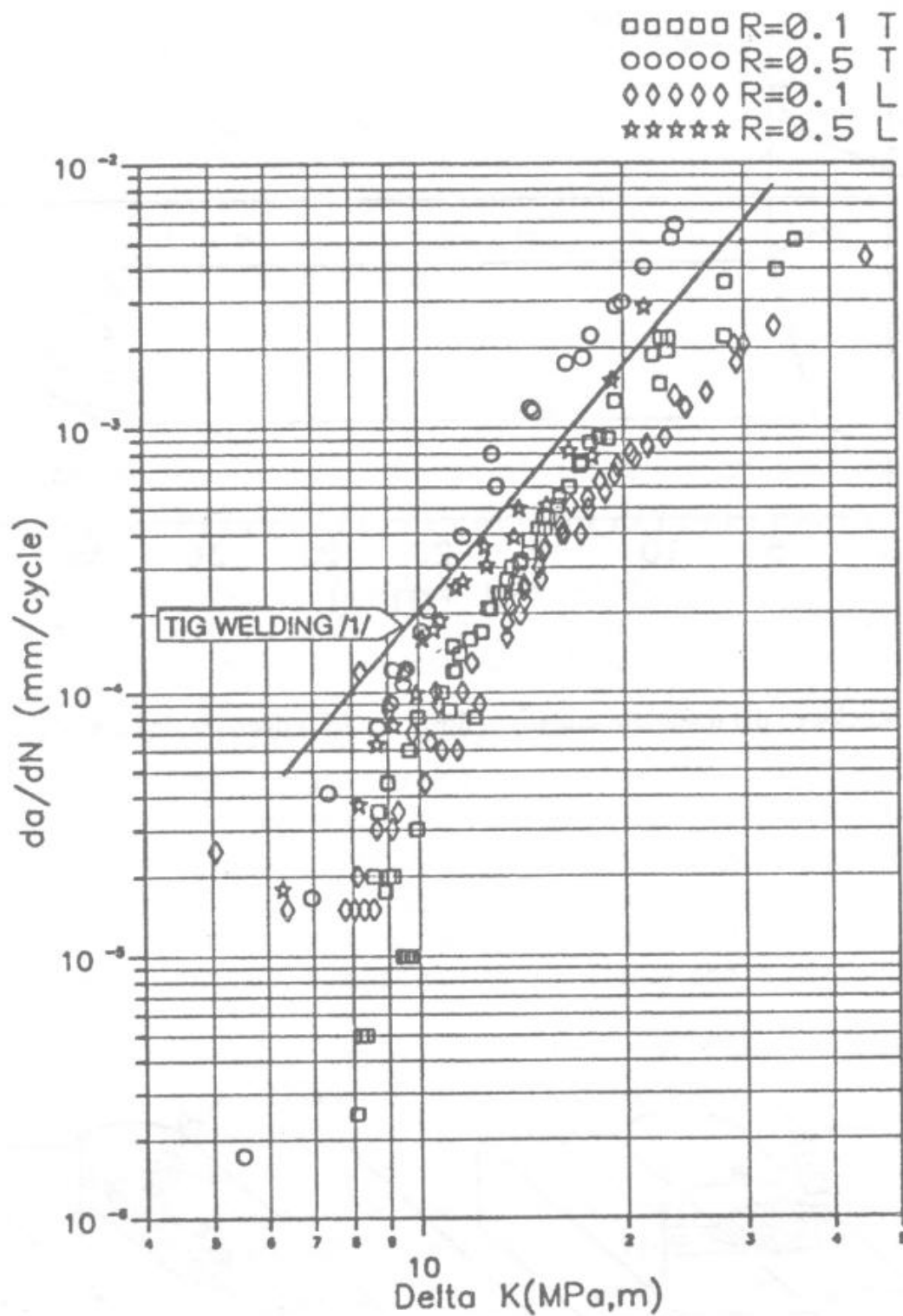


Fig. 3 - Confronto tra le velocità di propagazione ottenute per diversi orientamenti del difetto e valori di R.

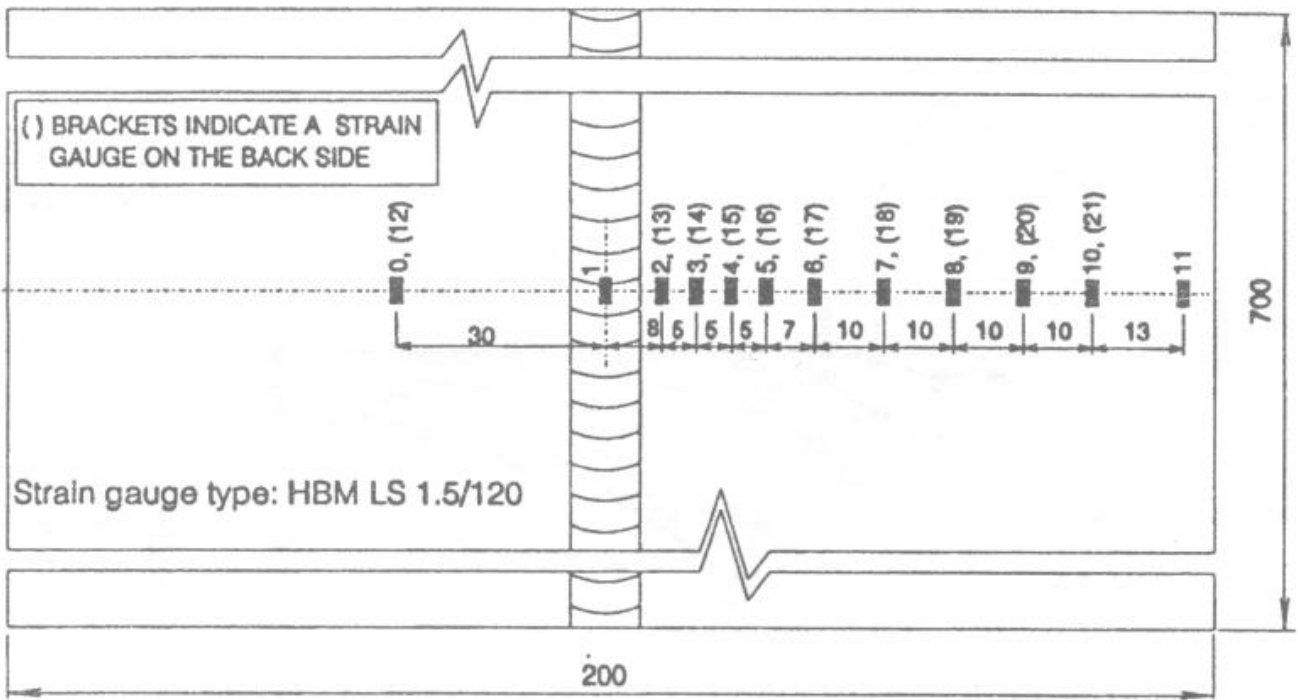


Fig. 4 - Tipica mappa estensimetrica per la valutazione delle deformazioni residue.

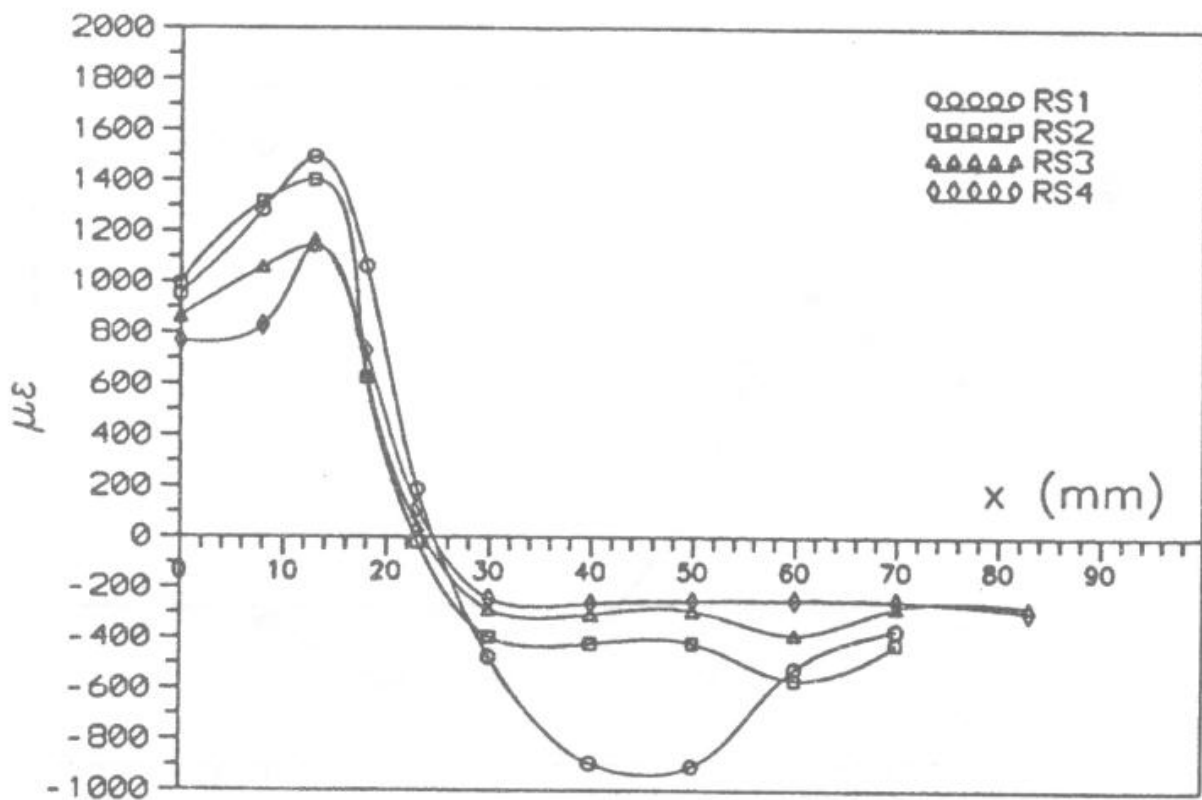


Fig. 5 - Distribuzione delle deformazioni longitudinali residue nei quattro provini RS.

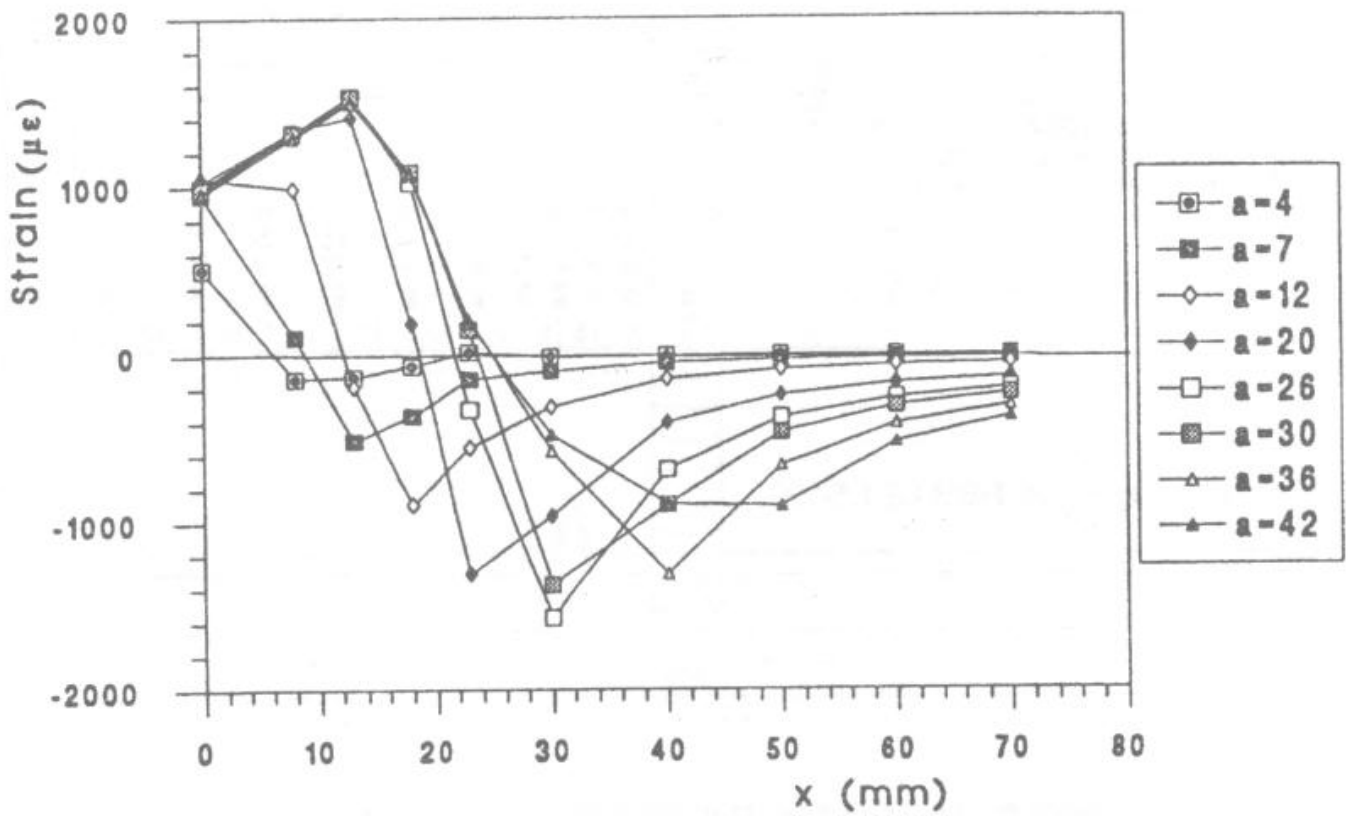


Fig. 6 - Evoluzione della distribuzione delle deformazioni residue nel campione RS1 durante la dissezione.

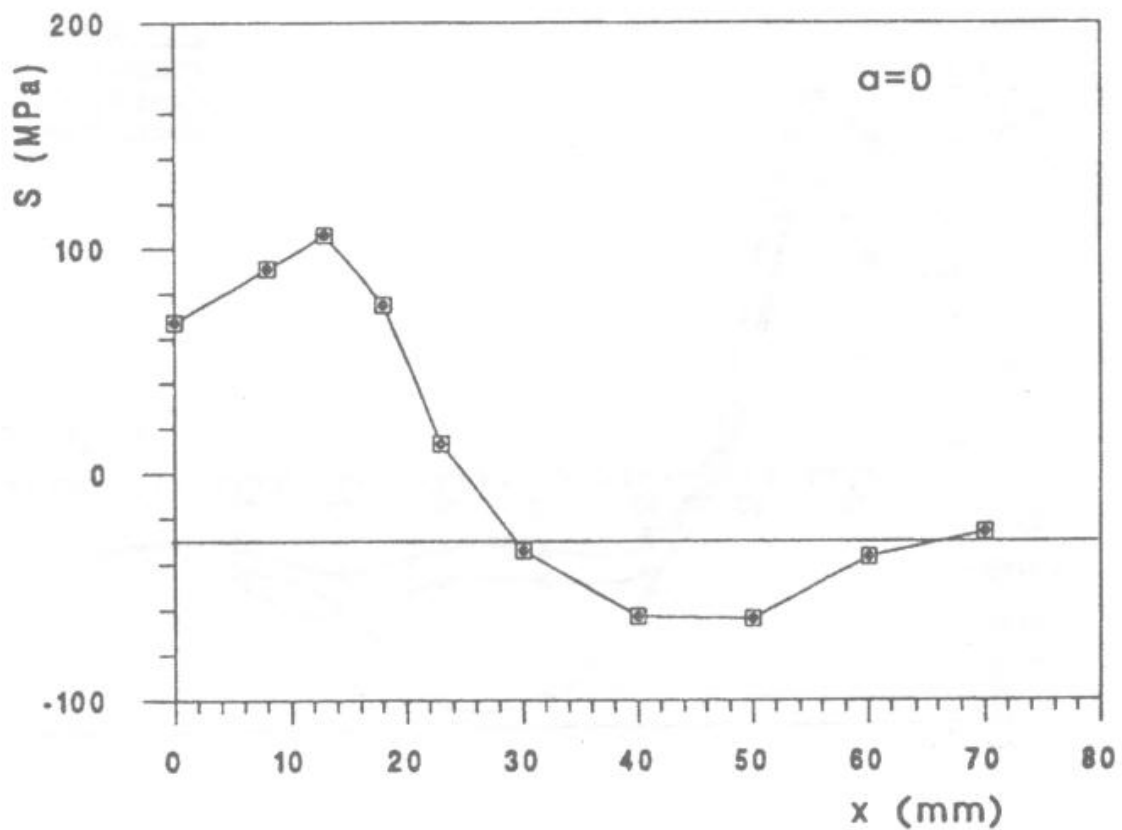


Fig. 7a - Distribuzione delle tensioni residue longitudinali nel campione RS1.

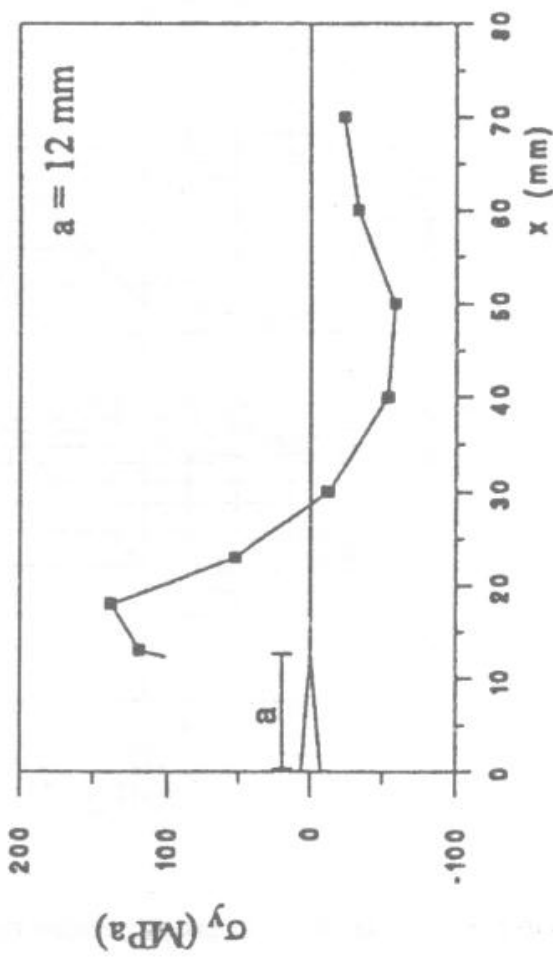
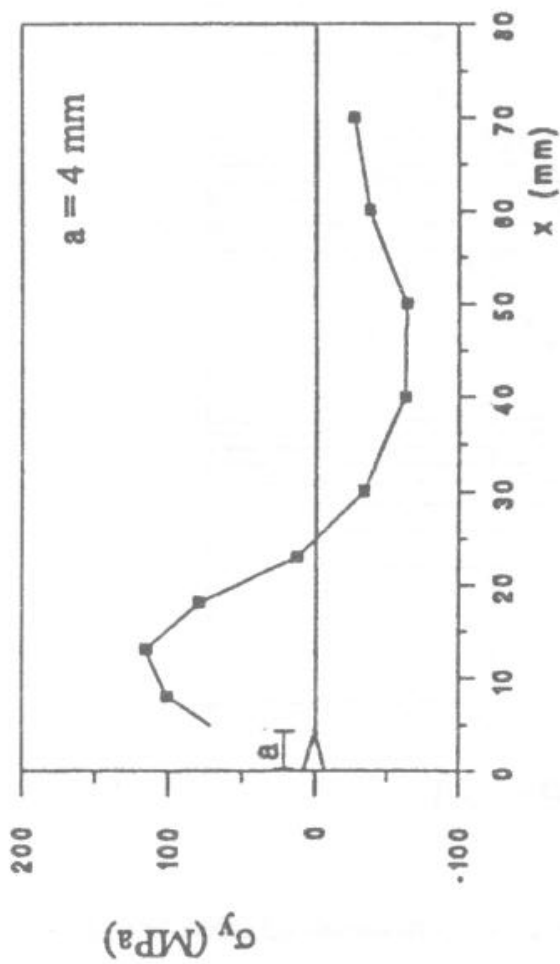
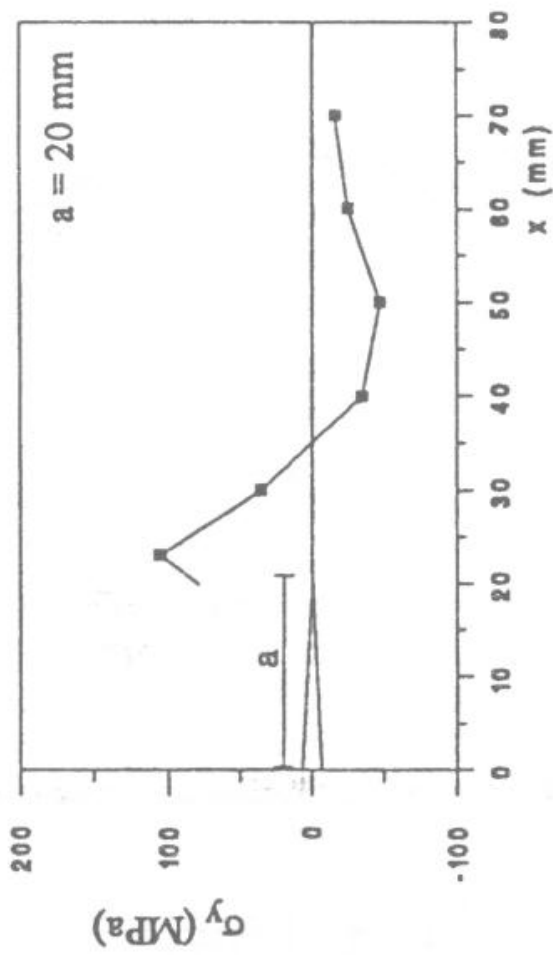
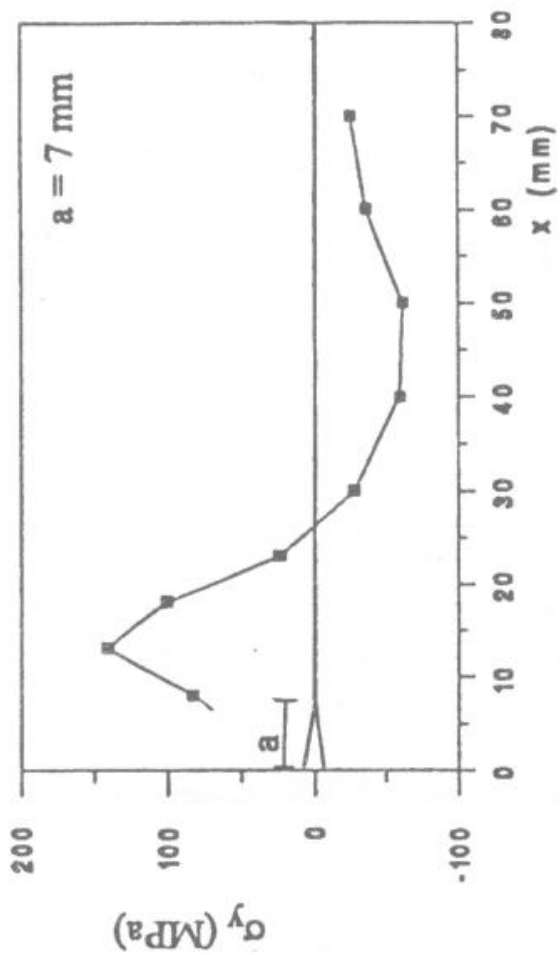


Fig. 7b - Distribuzione delle tensioni residue longitudinali nel campione RS1.

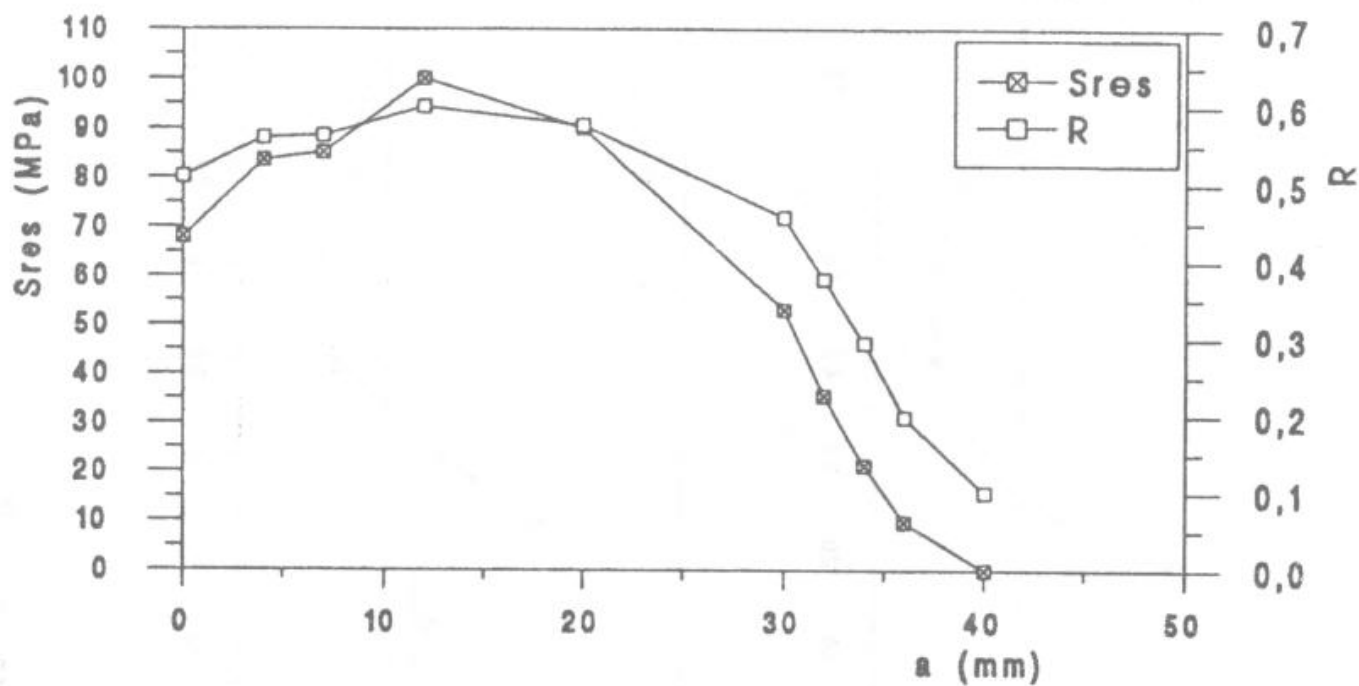


Fig. 8 - Tensione residua all'apice della cricca e valore effettivo di R in funzione della lunghezza di fessura.

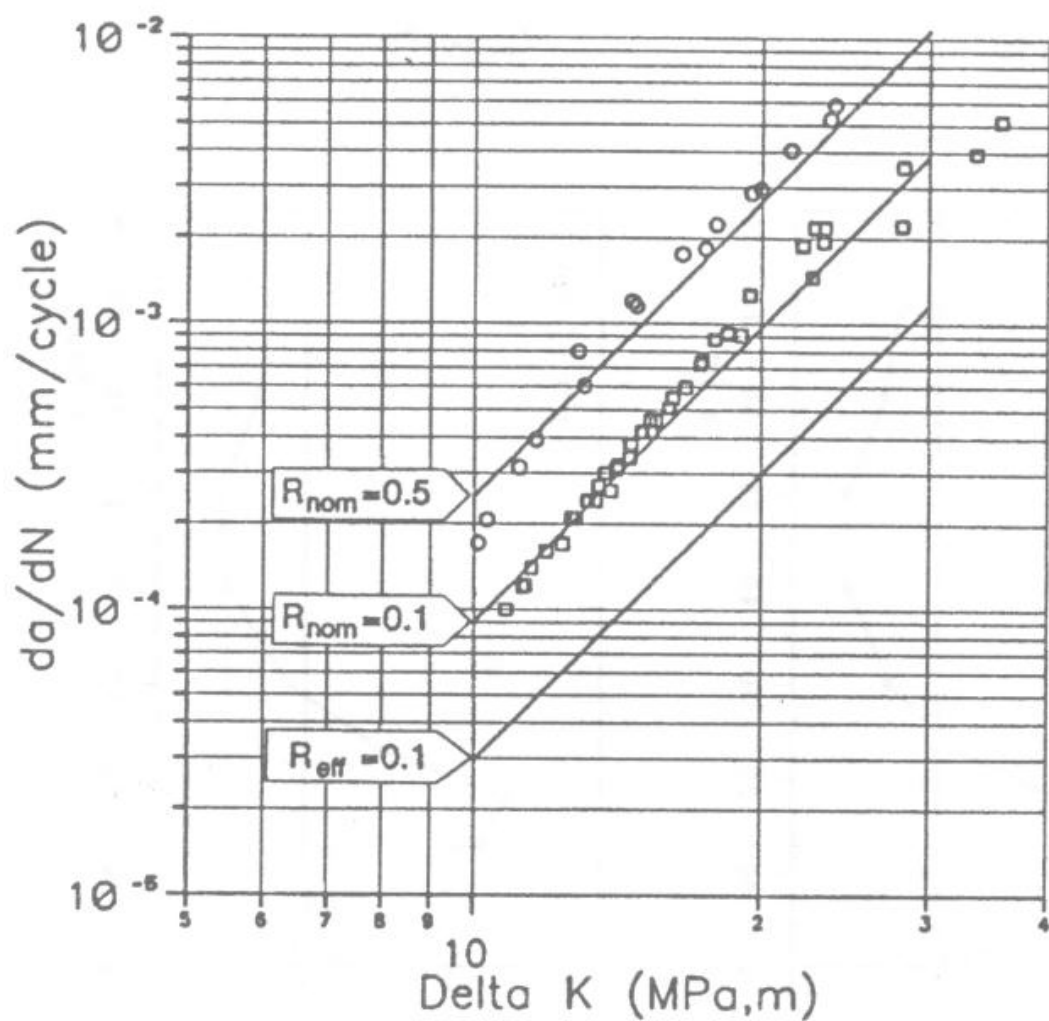


Fig. 9 - Confronto fra le curve di propagazione relative a valori nominali ed effettivi di R.

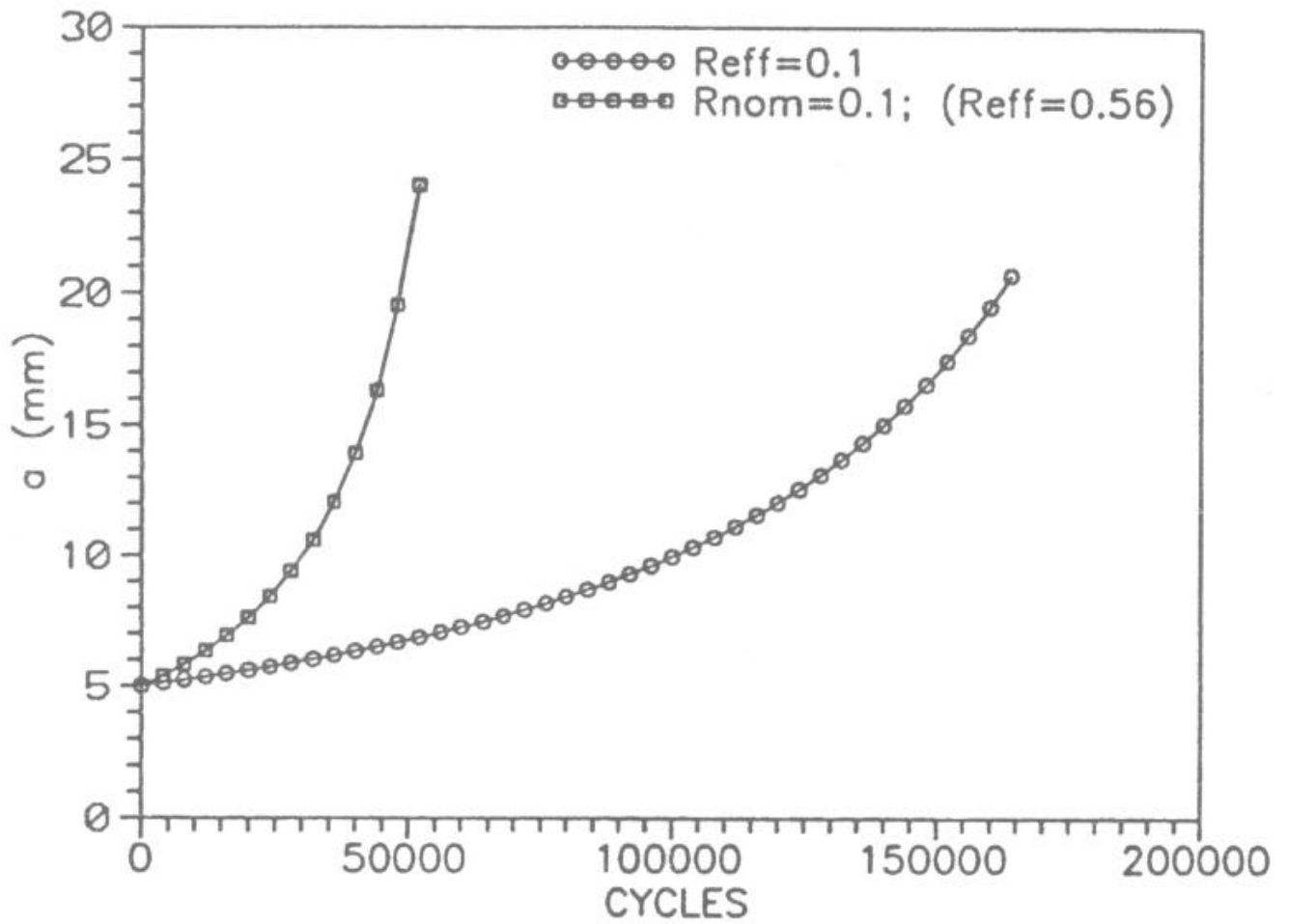


Fig. 10 - Simulazione numerica della propagazione di un difetto, in presenza e in assenza di tensioni residue.