

# COMPORTAMENTO A FATICA DI GIUNTI SALDATI IN LEGA DI ALLUMINIO

G.Crupi<sup>1,2</sup>, V.Crupi<sup>1,2</sup>, E.Guglielmino<sup>1</sup>, D.Taylor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria dei Materiali, Università di Messina, Italia

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Trinity College, Dublin, Ireland

## ABSTRACT

The aim of this work is the prediction of high-cycle fatigue behaviour in welded joints. Use of the maximum stress obtained from an elastic FEA results in a very conservative estimate of the fatigue limit that cannot be used in practice. Some new methods were recently developed [1] and applied to steel welded joints: the *Crack Modelling Method* and the *Critical Distance Methods*. In this paper those methods are extended to aluminium alloy welded joints. Specimens with different geometries (cruciform, T shaped, butt welds), dimensions and aluminium alloys were considered. The experimental fatigue limits were taken from the literature [2, 3]. In particular T-shaped welded joints, made of AlMg4.5Mn aluminium alloy and applied in ship structures, were analysed. Their fatigue limit was defined following the staircase procedure. The experimental values of the different welded joints were compared with those obtained from the numerical analysis, evaluated according the new methodologies. Good predictions were achieved using all the methods. Then the T welded joints were drilled with a passing hole through the welded and base materials. Their fatigue limit was defined following the staircase procedure and the fracture surfaces were analyzed using the SEM.

## SOMMARIO

Obiettivo del lavoro è la previsione del comportamento a fatica di giunti saldati in lega di alluminio. I metodi tradizionali, che fanno riferimento alla tensione massima ottenuta da un'analisi FE, forniscono risultati molto conservativi e, quindi, non utilizzabili. Alcuni nuovi metodi sono stati recentemente sviluppati [1] ed applicati a giunti saldati in acciaio: il *Crack Modelling Method* ed i *Critical Distance Methods*. Nel presente lavoro questi metodi sono stati estesi a giunti saldati in lega di alluminio. Sono stati considerati, utilizzando valori sperimentali del limite di fatica riportati in letteratura [2, 3], giunti saldati con differenti geometrie (cruciformi, a T, a testa), dimensioni e tipi di lega di alluminio. Successivamente è stato analizzato il comportamento a fatica di giunti saldati a T, adoperati in strutture navali e realizzati in lega di alluminio AlMg4.5Mn. Il limite di fatica è stato definito mediante la procedura *staircase*. I risultati sperimentali, relativi alle diverse tipologie dei giunti in alluminio, sono stati comparati con quelli ottenuti dall'analisi numerica, utilizzando i precedenti approcci, e sono state ottenute buone previsioni. Nei giunti saldati a T è stato, inoltre, introdotto un foro passante attraverso il materiale base e la zona saldata. Il limite di fatica è stato definito mediante *staircase* e la superficie di frattura è stata analizzata mediante un microscopio elettronico a scansione.

## INTRODUZIONE

Le saldature rappresentano delle zone critiche nella progettazione per due motivi principali: sono le zone più deboli di una struttura per la presenza di concentrazione delle tensioni e per le scarse proprietà del materiale ed è difficile predirne il comportamento a causa della difficoltà di definirne le proprietà del materiale e la geometria. Il metodo tradizionale di progettazione a fatica, chiamato *Stress-Life Approach*, che si basa soltanto sul valore massimo di tensione ottenuto da un'analisi FE non è accurato per due motivi:

- dà una stima eccessivamente conservativa del limite di fatica, che nella pratica non può essere usata;
- non sempre la frattura si origina dove si ha la tensione massima, poiché non sempre ad essa è associata il maggior gradiente di tensione.

Il comportamento a fatica dipende da tutto lo stato tensionale attorno ad un intaglio od ad una qualunque discontinuità e non solo dal valore massimo (*hot spot stress*). L'idea di base del *Critical Distance Approach* è che, affinché si abbia la frattura, il limite di fatica di un provino liscio  $\Delta\sigma_0$  deve essere superato non solo in un punto locale, ma dentro una regione attorno all'intaglio: volume critico. In pratica il problema è semplificato considerando la tensione in un punto posto ad una distanza critica rispetto al valore massimo: *critical distance*. Questa distanza fu calcolata in passato sperimentalmente ed è fortemente dipendente dal materiale. Taylor [4] propose che il valore della distanza critica poteva essere collegato al parametro della Meccanica della Frattura  $a_0$  definito da ElHaddad mediante l'equazione:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_0} \right)^2 \quad (1)$$

Questo nuovo approccio della *critical distance*, su cui si basano i nuovi metodi del *Crack Modelling Method* (CMM) [5] e dei *Critical Distance Methods* (CDM) [4], permette di considerare la possibilità che la frattura si abbia in un punto diverso da quello di massima tensione ed inoltre, a differenza dei metodi precedenti della *critical distance*, non richiede la conoscenza della geometria e delle dimensioni reali del difetto. Il CMM ed i CDM sono adatti per l'analisi dei giunti saldati poiché presentano i seguenti vantaggi:

- tengono conto di tutto il campo tensionale attorno alla cricca,
- possono essere applicati a qualunque difetto o discontinuità,
- richiedono una *mesh* non troppo accurata, specialmente il CMM.

Questi nuovi metodi, già applicati a giunti saldati in acciaio [1], sono stati estesi, nel presente lavoro, a giunti saldati in lega di alluminio.

## MATERIALI E METODI

E' stato analizzato il comportamento a fatica di giunti saldati in lega di alluminio con differenti geometrie, dimensioni e tipi di lega ed in particolare 8 giunti cruciformi ed a T [2], 4 giunti saldati a testa [3]. Sono stati studiati anche giunti saldati a T, adoperati in strutture navali e realizzati in lega di alluminio AlMg4.5Mn, denominata AA5083 (4-

4.9% Mg, 0.4% Si, 0.4% Fe, 0.4-1% Mn, 0.25 % Zn, 0.15 % Ti, 0.1% Cu, 0.05-0.25 % Cr, carico di snervamento pari a 255 MPa [2]). I giunti cruciformi e a T analizzati sono tutti di tipo *non load carrying* (nlc), ossia con zona saldata non caricata. I valori del limite di fatica per i giunti cruciformi ed a testa sono stati definiti da letteratura [2, 3] e per i giunti a T in AA5083 mediante la procedura *staircase*. I risultati sperimentali sono stati comparati con quelli ottenuti dall'analisi numerica, utilizzando il CMM ed i CDM.

### Modelli FE

E' stato utilizzato il *software ANSYS* per realizzare modelli FE bidimensionali con elementi quadratici a 8 nodi ed è stata applicata un'analisi elastica statica. La densità della *mesh* è stata variata ed infittita fino ad avere la convergenza per tutti i metodi analizzati. La zona saldata è stata modellata senza raggio di raccordo nel punto dove si unisce con il metallo base (intaglio acuto). La Figura 1 mostra la geometria dei giunti cruciformi. Essi hanno un angolo di apertura dell'intaglio  $\psi$  di  $135^\circ$  e le dimensioni A e B sono nei modelli FE rispettivamente pari a 51 mm e 356 mm. In tabella 2 sono riportati il tipo di lega di alluminio dei giunti e le altre dimensioni geometriche.

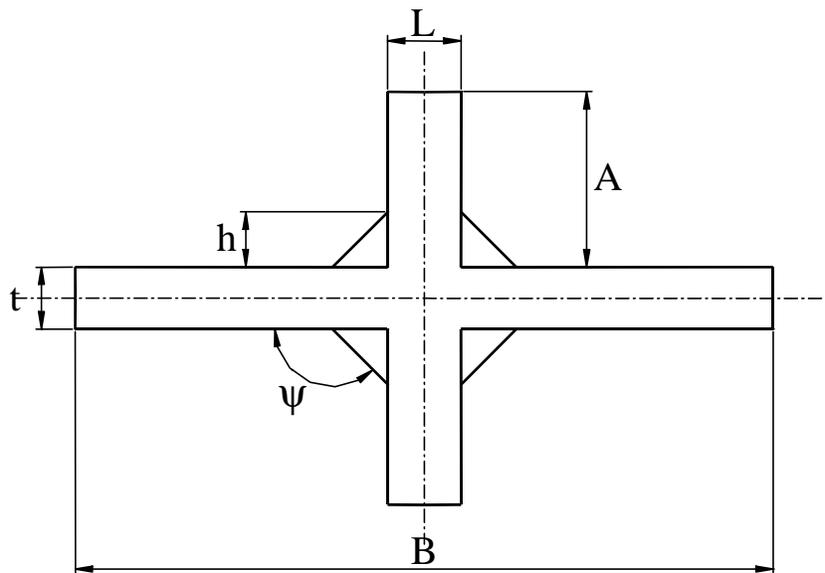
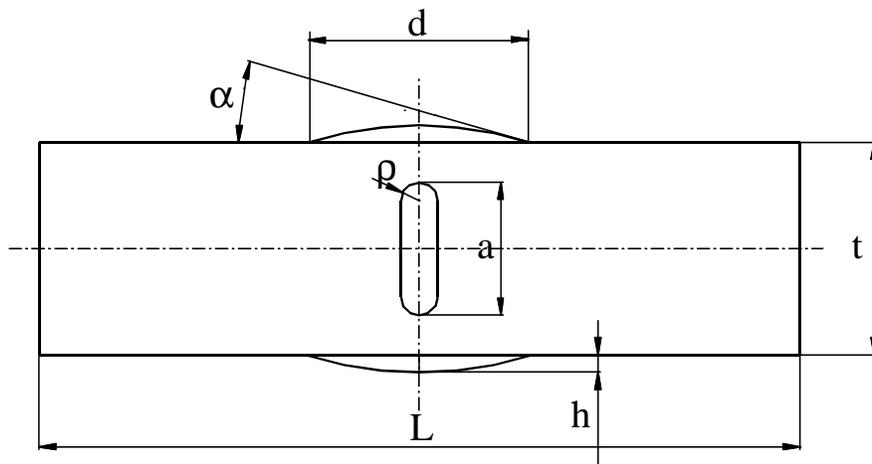


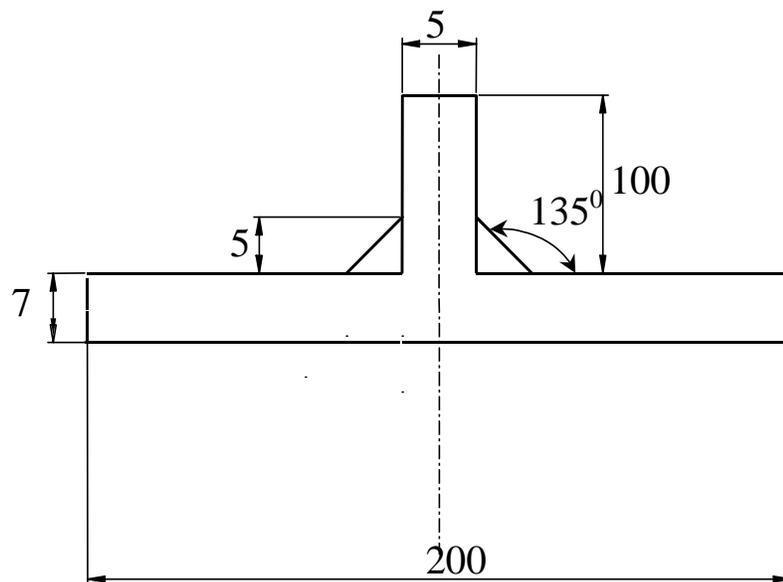
Figura 1 Giunto cruciforme

E' stato analizzato il comportamento a fatica di giunti saldati a testa con completa (cp) e parziale penetrazione (pp), realizzati in lega di alluminio AA5083. Per i giunti saldati a testa con parziale penetrazione la parte di sezione non saldata può essere considerata come una cricca e possono essere applicati i criteri e le formule della Meccanica della Frattura. La figura 2 mostra i giunti a testa analizzati. Per i giunti con parziale penetrazione  $p$  è uguale a 0.1 mm ed "a" è uguale a 7.5 mm per i giunti con 25 mm di spessore e 2.5 mm per i giunti con 5 mm di spessore. Le altre dimensioni geometriche dei giunti analizzati sono riportate in tabella 3.



*Figura 2 Giunto saldato a testa*

In figura3 sono riportate le dimensioni geometriche del giunto a T in lega di alluminio AA5083.



*Figura 3 Giunto a T in AA5083*

Nei modelli FE il materiale è stato considerato come isotropo con modulo elastico pari a 68 GPa ed un coefficiente di Poisson di 0.3. Nella modellazione numerica è stato considerato un quarto del giunto cruciforme reale e metà del giunto a T, imponendo condizioni di simmetria sui semiassi. E' stata applicata una pressione unitaria di trazione ad una estremità mentre l'altra è stata incastrata. Le figure 4 e 5 mostrano alcuni modelli FE.

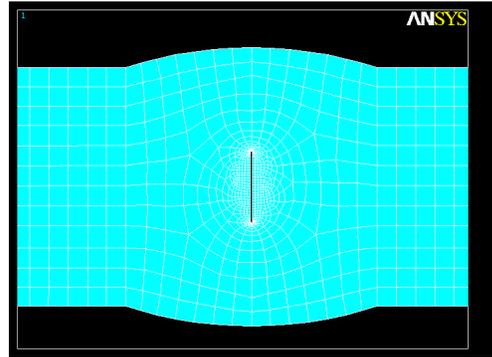
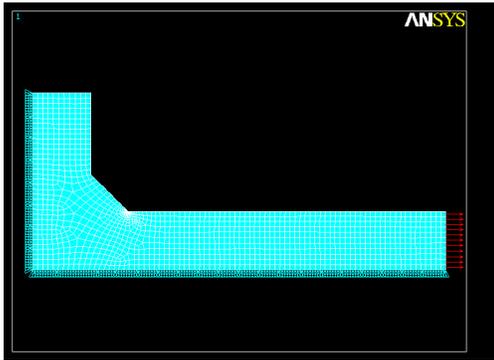


Figura 4 Modello FE di un giunto cruciforme Figura 5 Modello FE di un giunto a testa

### Crack Modelling Method e Critical Distance Methods

I CDM [4] assumono che la frattura per fatica avvenga se il valore medio di tensione dentro un definito volume di materiale, attorno alla zona di concentrazione delle tensioni, supera il valore del limite di fatica del provino liscio. Per applicare i CDM, si calcola dall'analisi FE l'andamento delle tensioni  $\sigma$ - $r$  lungo una linea che parte dall' *hot spot stress* in direzione normale alla direzione della massima tensione principale nel punto più sollecitato (*hot spot stress*). Il *Point Method* (PM) considera il valore di tensione ad una data distanza pari ad  $a_0/2$ , il *Line Method* (LM) la tensione media lungo una linea, di lunghezza pari a  $2a_0$  e che parte dal punto di *hot spot stress* nella direzione della normale alla sua tensione principale massima (figura 6).

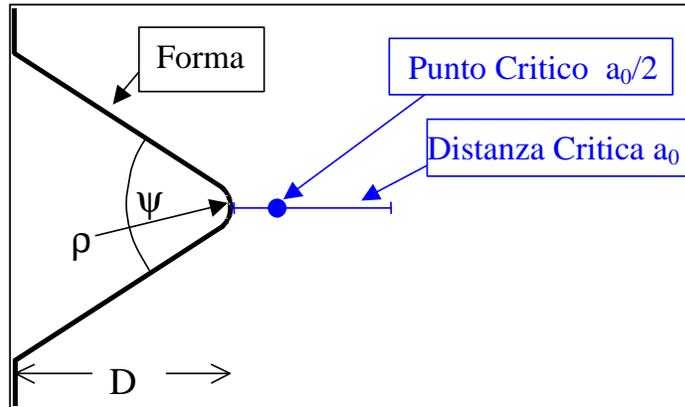


Figura 6 Geometria di un intaglio

I valori della distanza critica  $a_0$  e del valore di soglia  $\Delta K_{th}$  possono essere trovati risolvendo contemporaneamente le seguenti equazioni [1]:

$$\Delta K_{th} = F \Delta \sigma_{on,w} (\pi(D+a_0))^{0.5} \quad (2)$$

$$\Delta K_{th} = \Delta \sigma_{o,w} (\pi a_0)^{0.5} \quad (3)$$

dove  $F$  è un parametro dipendente dalla geometria del provino e della cricca,  $D$  è la dimensione iniziale della cricca. I valori di  $\Delta \sigma_{o,w}$  e  $\Delta \sigma_{on,w}$ , che rappresentano rispettivamente i limiti di fatica per provini saldati a testa lisci ed intagliati, sono stati determinati sperimentalmente per leghe di alluminio AA5083 con  $R=-1$  [3]. Nel caso di

R=0 i valori di  $\Delta K_{th}$  e  $\Delta\sigma_{o,w}$  per leghe AA5083 sono stati ottenuti da letteratura [3, 6] ed i valori di  $a_o$  e  $\Delta\sigma_{on,w}$  sono stati determinati risolvendo il precedente sistema di equazioni (equazioni 2 e 3). In tabella 1 sono riportati i valori dei parametri del materiale per giunti saldati relativi ad una vita a fatica di 5 milioni di cicli.

| Geometria                               | Giunti a testa | Giunti cruciformi ed a T |
|---|----------------|--------------------------|
| R                                       | -1             | 0                        |
| $\Delta\sigma_{o,w}$ [MPa]              | 75             | 130                      |
| $\Delta\sigma_{on,w}$ [MPa]             | 13             | 14                       |
| $a_o$ [mm]                              | 0.168          | 0.075                    |
| $\Delta K_{th}$ [MPa m <sup>0.5</sup> ] | 1.72           | 2                        |

TABELLA 1 Parametri per giunti saldati in AA5083 per  $N_f=5$  milioni di cicli.

In figura 7 è riportato il diagramma di flusso del CMM [5].

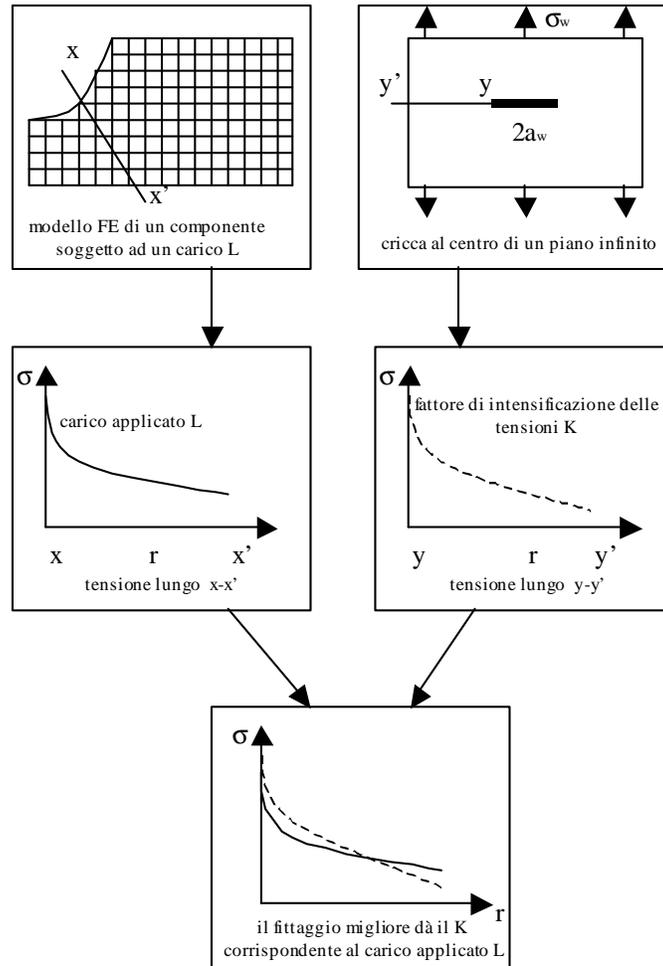


Figura 7 Diagramma di flusso del CMM

Questo approccio rappresenta qualsiasi discontinuità come una cricca equivalente. Si basa sul concetto che due qualsiasi difetti, che presentano la stessa distribuzione di tensione, hanno la medesima resistenza a fatica.

Si considera una generica cricca, per la quale, a differenza di un generico difetto, è possibile definire  $F$  ed  $a_c$ . L'andamento delle tensioni nella direzione della cricca è definito dall'equazione semplificata di Westergaard:

$$\sigma = \frac{\Delta K}{\sqrt{2\pi r}} \quad (4)$$

dove  $\Delta K$  è il Fattore di Intensificazione delle Tensioni definito da:

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a_c} \quad (5)$$

Si variano  $a_c$  ed il  $\Delta\sigma$  relativi alla cricca, finché non si ottiene un andamento delle tensioni simile a quello calcolato dal modello FE del difetto in esame lungo una direzione ortogonale alla massima tensione principale a partire dal punto più sollecitato. Si ottengono così i due valori  $a_c^*$  ed  $\Delta\sigma^*$  che consentono il migliore fittaggio. Ottenuta la cricca equivalente si varia il carico applicato, finché il  $\Delta K$  della cricca equivalente sia  $\Delta K = \Delta K_{th}$  e si definisce il carico di fatica del materiale come il corrispondente valore di carico applicato. Il metodo del CMM tiene conto di tutto lo stato tensionale e perciò è meno sensibile alla *mesh* locale attorno al punto più sollecitato.

### Prove sperimentali

Il limite di fatica dei giunti saldati a T nlc in AA5083 è stato calcolato mediante *staircase*. Tutti i provini sono stati mantenuti alla temperatura di 345 °C per 3 ore nel forno sotto vuoto per eliminare le tensioni residue prima di essere testati. Tutte le prove di fatica (figura 8) sono state condotte applicando carichi assiali ad una frequenza di 18 Hz con un rapporto di carico R pari a 0.1, assumendo 2 milioni come il massimo numero di cicli.



Figura 8 Prova di fatica.

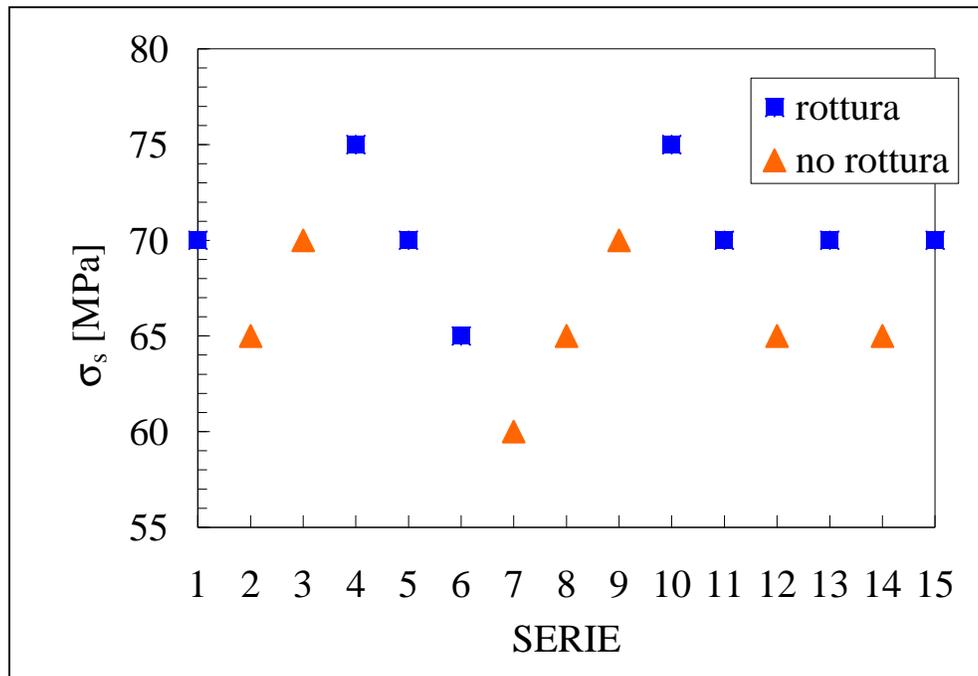


Figura 9 Staircase dei giunti a T

E' stato applicata inizialmente una tensione massima pari a 70 MPa, e quindi il carico è stato variato in funzione dei risultati delle prove: in caso di rottura aumentato di una determinata quantità altrimenti diminuito. Lo step di carico è stato scelto pari a 5 MPa. Questa procedura è stata applicata a 15 provini. La figura 9 riporta le tensioni massime applicate per i vari provini. Il limite di fatica, corrispondente ad una probabilità di frattura del 50 %, è stato calcolato essere pari a 68 MPa con una deviazione standard di 3.54 MPa. Nei giunti saldati a T è stato introdotto un foro passante attraverso il materiale base e la zona saldata (figura 10).



Figura 10 Giunto con foro passante

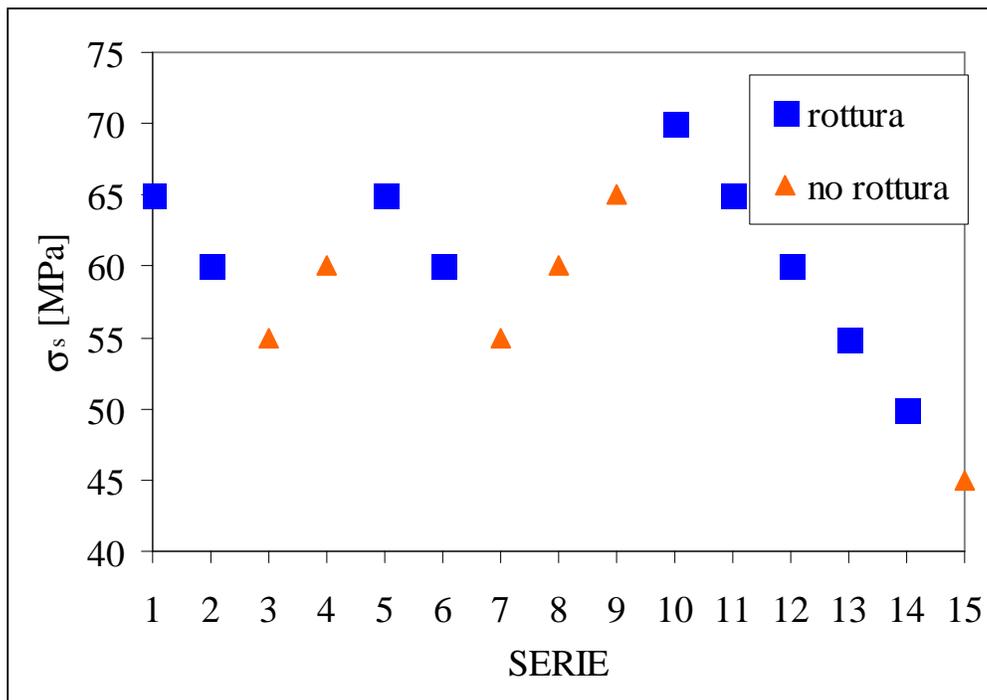


Figura 11 Staircase dei giunti a T con foro

Il limite di fatica, corrispondente ad una probabilità di frattura del 50 %, è stato definito mediante *staircase* (figura 11) essere pari a 57.5 MPa con una deviazione standard di 13.73 MPa.

In base ad i risultati ottenuti applicando lo *staircase* ai giunti saldati a T con e senza foro, si desume che la presenza del foro non influenza molto il valore del limite di fatica, ma produce un cambiamento della posizione da cui inizia la frattura. Generalmente la frattura si origina a partire da un punto interno al foro dove termina la zona saldata e inizia l'area del metallo base (figura 12). Tuttavia in tre prove sperimentali la rottura è iniziata dall'apice della saldatura come nei giunti a T senza foro.



Figura 12 Zona di origine della frattura

I provini rotti sono stati analizzati usando un microscopio elettronico a scansione con ingrandimenti pari a 300 volte. La figura 13 mostra la superficie di frattura analizzata. L'esame macroscopico rivela un aspetto caratteristico della superficie di frattura per fatica. La frattura si propaga dapprima a 90° e poi, man mano che aumenta l'ampiezza della zona plastica, completa la propagazione a 45° come illustrato in figura 13.

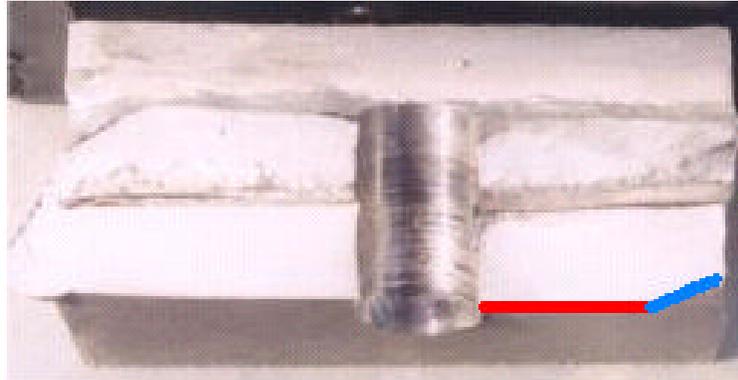


Figura 13 Superficie analizzata

La frattura si origina per fatica e si propaga poi per frattura rapida. Dalle immagini rilevate al microscopio elettronico si può quindi osservare che la zona nelle vicinanze del foro, da cui presumibilmente si è originata la frattura, manifesta le caratteristiche proprie della frattura per fatica, mentre dalla parte opposta si evidenzia un aspetto tipico della frattura rapida (figura 14).

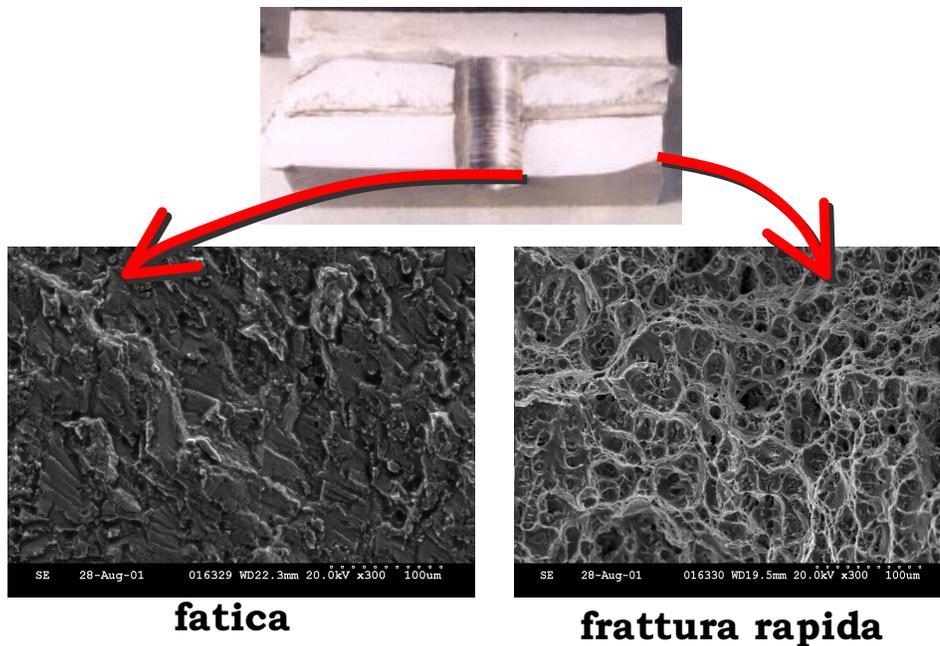


Figura 14 Immagini SEM

## RISULTATI

Le tabelle 2 e 3 riportano i valori sperimentali [2, 3] e gli errori percentuali delle previsioni numeriche della resistenza a fatica relativa ad una vita a fatica di 5 milioni di

cicli per giunti saldati nlc soggetti a carichi dinamici assiali con rapporto di carico R pari a 0.1 e -1.

| Geometria | Materiale | t<br>[mm] | L<br>[mm] | H<br>[mm] | Valore sper.<br>$\Delta\sigma_{on}$ [MPa] | CMM<br>errore % | PM<br>errore % | LM<br>errore % |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|-----------------|----------------|----------------|
| Cruc      | 6061-T6   | 3         | 3         | 5         | 59.3                                      | 8               | -5             | -9             |
| Cruc      | 6061-T6   | 6         | 6         | 7         | 45.3                                      | 6               | -11            | -16            |
| Cruc      | 6061-T6   | 12        | 12        | 10        | 40.5                                      | 14              | -2             | -7             |
| Cruc      | 6061-T6   | 24        | 24        | 20        | 29.1                                      | 6               | -11            | -16            |
| Cruc      | 6061-T6   | 24        | 6         | 7         | 40.9                                      | 16              | 2              | 0              |
| Cruc      | 6061-T6   | 12        | 6         | 7         | 38  | 4               | -12            | -18            |
| T         | 5083-H3   | 12        | 10        | 8         | 43.1                                      | -6              | -21            | -26            |
| T         | 6061-T651 | 12        | 12        | 8         | 53  | 13              | 1              | -4             |

TABELLA 2 previsioni a fatica per giunti in lega di alluminio con  $R=0.1$ .

| Geo. | T<br>[mm] | L<br>[mm] | d<br>[mm] | $\alpha$<br>[gradi] | Valore sper.<br>$\Delta\sigma_{on}$ [MPa] | CMM<br>errore % | PM<br>errore % | LM<br>errore % |
|------|-----------|-----------|-----------|---------------------|---|-----------------|----------------|----------------|
| cp   | 25        | 200       | 20.39     | 17.8                | 50  | -10.2           | 6              | 1.8            |
| cp   | 5         | 100       | 10.15     | 32.2                | 50  | -3.6            | 3.6            | -1.4           |
| pp   | 25        | 200       | 26.37     | 17.8                | 17  | 14.7            | 17.6           | 4.7            |
| pp   | 5         | 100       | 9.17      | 32.2                | 18  | -56.1           | -55.6          | -76.1          |

TABELLA 3 previsioni a fatica di giunti saldati a testa in lega AA5083 con  $R=-1$ .

Il *Crack Modelling Method* ed i *Critical Distance Methods* sono stati applicati per determinare il limite di fatica del giunto a T in lega di alluminio AA5083. La figura 15 mostra il modello FE del giunto a T e l'andamento delle tensioni nella zona dell'intaglio.

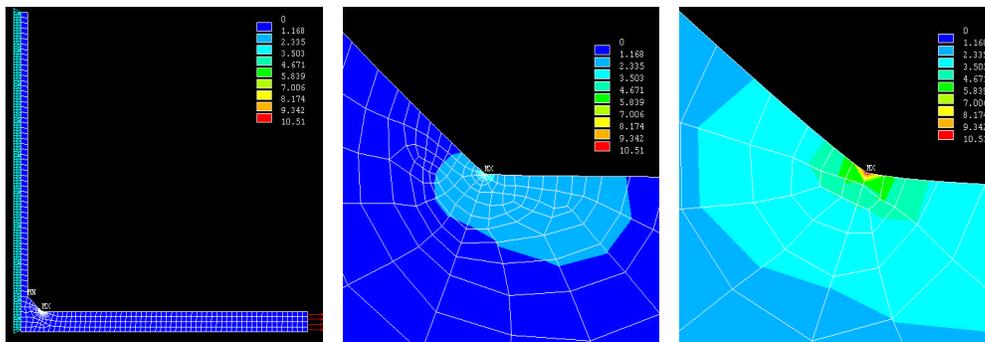


Figura 15 modello FE del giunto a T

In tabella 4 sono riportati gli errori percentuali rispetto al valore sperimentale.

| CMM errore % | PM errore % | LM errore % |
|--------------|-------------|-------------|
| 8.24         | 4.71        | 0.06        |

TABELLA 4 previsioni a fatica di giunti saldati a T in lega AA5083 con  $R=0.1$

Il CMM ed i CDM, in particolare il LM, forniscono delle ottime previsioni, con errori percentuali inferiori al 20 %. Tutti i 3 metodi (CMM, PM, LM) convergono utilizzando una *mesh* non eccessivamente accurata con dimensioni dell'elemento più piccolo dell'ordine dei  $10^{-2}$  mm.

## DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

La resistenza a fatica di diversi giunti saldati è stata definita mediante differenti approcci e si sono avute buone previsioni. Un errore nelle predizioni inferiore del 20 % è stato considerato accettabile, poiché errori di oltre il 10% possono essere presenti nei valori sperimentali e nei risultati FE. Dall'analisi dei risultati ottenuti, si può concludere che i metodi PM, LM, CMM forniscono predizioni generalmente accettabili e con andamenti simili. Il CMM dà risultati spesso buoni ma presenta maggiori variazioni. Il CMM ed i CDM sono relativamente facili da usare e da interfacciare con i comuni *software* FE; necessitano soltanto di parametri relativi al materiale e possono essere utilizzati con qualsiasi geometria. Il PM, anche se accurato, necessita una *mesh* relativamente fine comparata con il LM ed il CMM, poiché richiede la conoscenza del valore di tensione in prossimità dell'apice dell'intaglio.

Un caso analizzato, relativo al giunto saldato a testa con parziale penetrazione e 5 mm di spessore, fornisce predizioni particolarmente scarse. Non è chiaro perché questo avvenga, soprattutto se si considera che la sua geometria è abbastanza semplice. Probabilmente la geometria del provino, che contiene bolle nella saldatura, non è stata ben definita.

Dai risultati delle prove sperimentali su giunti saldati a T si deduce che la presenza di un foro passante non influenza molto il valore del limite di fatica, ma produce una variazione dell'origine di frattura.

## BIBLIOGRAFIA

1. Taylor D., Barrett N., Lucano G., "Some New Methods for Predicting Fatigue in Welded Joints" International Journal of Fatigue 2002, **24** 509-518.

2. Lazzarin P., Livieri P., “*Notch Stress Intensity Factors and Fatigue Strength of Aluminium and Steel Welded Joints*”, International Journal of Fatigue 2001, **23** 225-232.
3. Sonsino C.M., Radaj D., Brandt U., Lehrke H.P., “*Fatigue Assessment of Welded Joints in AlMg 4.5 Mn Aluminium Alloy (AA 5083) by Local Approach*”, International Journal of Fatigue 1999, **21** 985-999.
4. Taylor D., “*Geometrical Effects in Fatigue: an Unifying Theoretical Model*” International Journal of Fatigue 1999, **21** 413-420.
5. Taylor D., Lawless S., “*Prediction of Fatigue Behaviour in Stress-Concentrators of Arbitrary Geometry*” Engineering Fracture Mechanics 1996, **6** 929-939.
6. American Society for Metals, *ASM Handbook*, 1996, **19** pp. 823.