

VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA A FATICA DI LAP-JOINTS SALDATI

Stefano Beretta¹, Giuseppe Sala²

¹Dip. di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 34, 20156 Milano

²Dip. di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano, Via La Masa 34, 20156 Milano

stefano.beretta@polimi.it, giuseppe.sala@polimi.it

Sommario

I più avanzati telai di auto e moto sono costituiti da travi in lega leggera d'alluminio scatolate saldate. Una delle più rilevanti soluzioni tecnologiche consiste in giunzioni a sovrapposizione (lap-joint) di lamiere sagomate mediante stampaggio. Poiché i telai sono soggetti a rilevanti carichi di fatica, la valutazione della resistenza a fatica di tali giunzioni, soprattutto considerando la presenza di difetti e disomogeneità dovute al processo tecnologico, è l'elemento chiave del progetto dei componenti. Le presente ricerca riguarda la valutazione della resistenza a fatica di questo tipo di giunzioni soggette a flessione ed azione assiale. La prima parte dell'attività è consistita nell'ottenimento delle curve S-N della giunzione ed in un esame frattografico che ha mostrato la presenza di numerosi difetti e disomogeneità nella giunzione. In conseguenza di ciò è stata eseguita un'analisi numerica per ricavare il fattore di intensità degli sforzi dovuto alla singolarità geometrica del giunto ed alla presenza di difetti. Tale analisi, insieme con una descrizione statistica della popolazione dei difetti, ha permesso di ottenere una metodologia per la previsione della resistenza a fatica di tali giunzioni.

Abstract

The most advanced structural frames of cars and motorcycles are made of aluminium alloys welded box girders. One of the most popular technological solution consists of lap-joints between press-formed metalsheets. Because the frames undergo relevant fatigue loads, the evaluation of fatigue endurance of this kind of connections, also considering the presence of defects and un-homogeneities due to the technological process, plays a crucial role during the development of components design. The present research deals with the evaluation of fatigue behaviour of these welded joints, subjected to tensile and bending loads. The first part of the activity was devoted to the evaluation of joints S-N curves, as well as to the fractographic analysis, which pointed out the presence of several defects ad un-homogeneities. As a consequence, a numerical anaysis was performed to evaluate the stress intensity factor due to the joint geometric singularity and the presence of defects. Such an analysis, together with the statistical description of defects population, allowed to develop a methodology able to predict the fatigue endurance of these joints.

1. Introduzione

La saldatura è un tipo di giunzione che consente di unire parti solide ripristinando la continuità del materiale. In virtù di tale continuità, le linee di flusso degli sforzi possono distribuirsi liberamente nella struttura. Una progettazione non accurata può comportare un eccessivo addensamento di tali linee, con conseguente possibilità di deformazioni plastiche locali, diminuzione della resistenza a fatica e rischio di rottura fragile. Inoltre, un'eventuale rottura innescata in un elemento, anche secondario, può propagarsi attraverso i giunti sino ad interessare gli elementi principali e danneggiare l'intera struttura, se la tenacità del materiale non è tale da arrestarla. Infine, i processi di saldatura sono governati da numerosi parametri, la cui variabilità può influenzare significativamente le prestazioni del giunto.

Il problema è tanto più rilevante per quelle strutture in cui la sicurezza è prerogativa irrinunciabile, quali i telai dei mezzi di trasporto (veicoli ferrotranviari, automobili, motociclette) dovuti a rilevanti carichi ciclici dovuti alle asperità del terreno, alle vibrazioni del motore ed alle manovre (accelerazioni, frenate, etc). Tutto ciò si traduce in importanti sollecitazioni di fatica, che interessano in modo particolare le saldature.

E' quindi importante determinare il comportamento a fatica di queste strutture saldate in lega leggera d'alluminio, ponendo particolare attenzione al ruolo svolto dalla difettosità insita nelle saldature, nell'influenzare il limite di fatica del giunto. In particolare in questo lavoro si esamina la resistenza a fatica delle giunzioni correnti in termini di 'lap-joint' [1,2], analizzando l'effetto dei difetti di saldatura sulla singolarità all'apice della frattura.

2. Telaio e Provini

Il telaio motociclistico preso in considerazione, mostrato in Fig.1, è costituito da un canotto di collegamento alla forcella anteriore, una doppia trave scatolata, piastre ed attacchi al motore, serbatoio, forcellone posteriore e telaio reggisella. Le piastre e gli attacchi sono getti di fusione in G- $AlSi_7MgTi$, le travi scatolate sono stampate in P- $AlMg_4MnCr$. Le saldature sono realizzate per semplice sovrapposizione ed eseguite con tecnologia MIG, utilizzando come materiale d'apporto AWS ASME II C SFA 5.10. Si possono individuare saldature longitudinali tra lamiera e lamiera lungo le travi scatolate e saldature trasversali tra lamiera e getto, che collegano le travi con il canotto e le piastre di attacco.

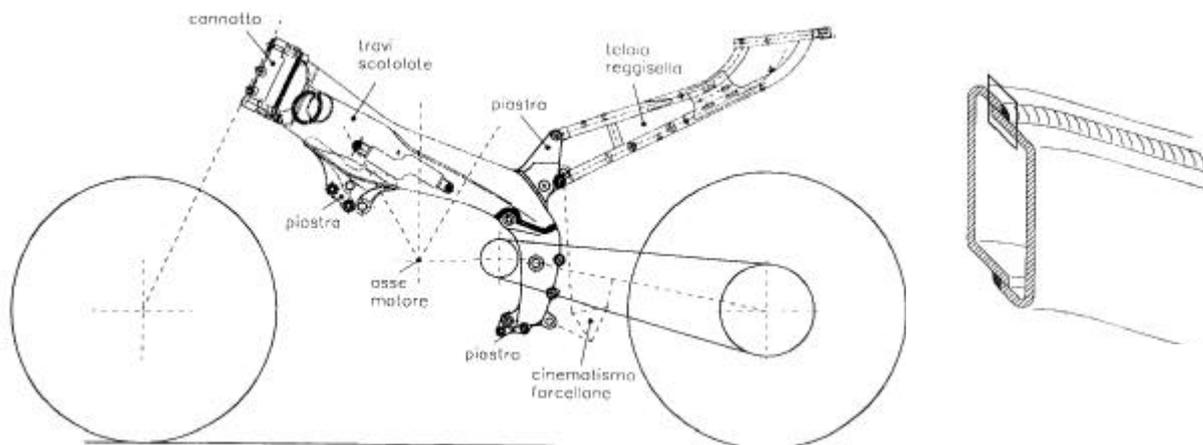


Figura 1: Telaio motociclistico scatolato e tipiche sezioni

Per determinare le sollecitazioni agenti sulle saldature lamiera-lamiera più rappresentative si sono considerate due condizioni di carico: ostacolo/buca (accelerazione verticale 2,5g) e frenata (accelerazione orizzontale 0,8g). Tali condizioni di carico inerziali, applicate alle masse della motocicletta (comprehensive del pilota e passeggero, motore, serbatoio con carburante ed accessori) sono state studiate per mezzo di uno schema a travi [3], dal quale si sono ricavate le sollecitazioni agenti sulle giunzioni correnti. La Fig.2 mostra i provini che riproducono i tre tipi di sollecitazione $\sigma_{//}$, $\tau_{//}$ e σ_{\perp} relative alle giunzioni considerate.

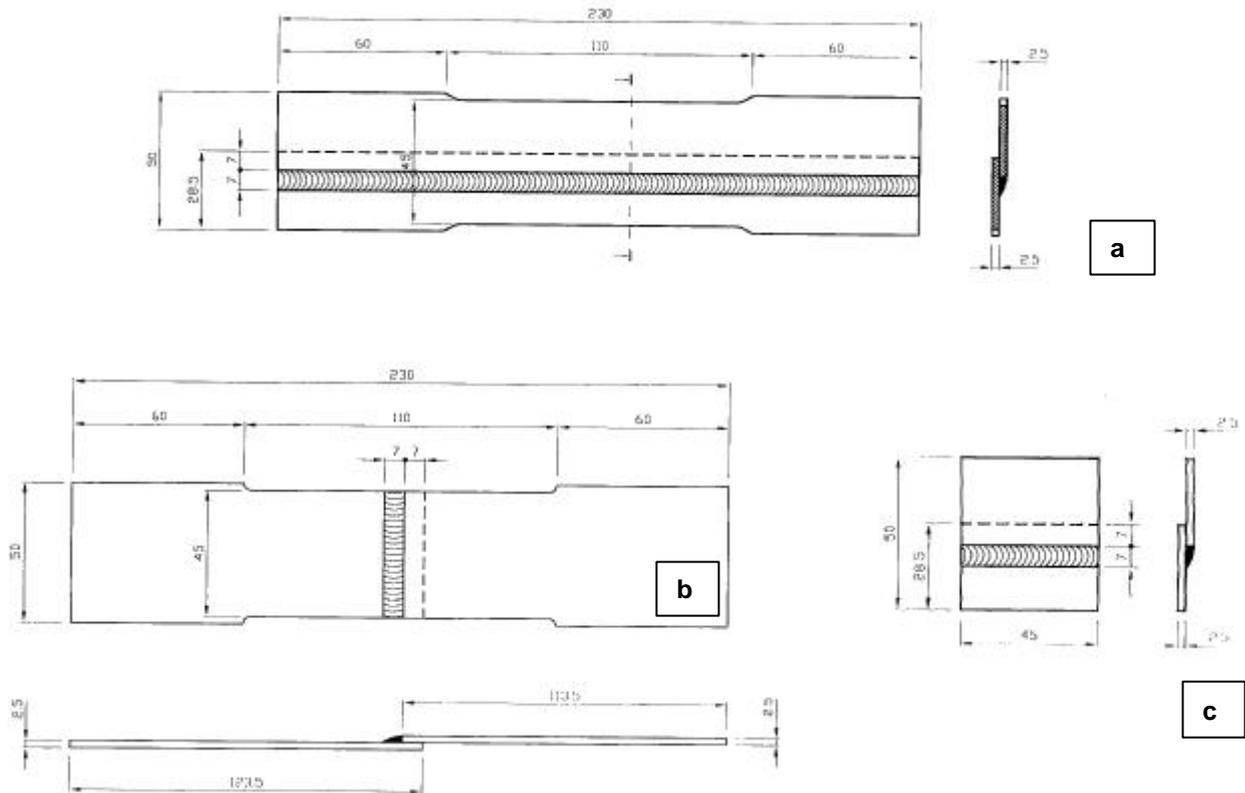


Figura 2: Provini di saldatura: a) provino soggetto a $s_{//}$ (provino LO); b) provino soggetto a s_{\perp} (provino TR); provino soggetto a $t_{//}$ (provino SH)

3. Sperimentazione

La campagna sperimentale è stata preceduta da una caratterizzazione statica del materiale base e dei tre tipi di provini scelti per la caratterizzazione [3].

La sperimentazione si quindi è rivolta al rilievo della velocità di propagazione delle cricche nel materiale e nell'ottenimento delle curve S-N per i due giunti saldati. Le prove di fatica sono state eseguite su una macchina idraulica della capacità di 120 kN.

3.1 Velocità di propagazione dei difetti

La velocità di propagazione delle cricche è stata ottenuta mediante provini SENT della larghezza di 20 mm sui quali era stato preparato un intaglio della profondità di 2 mm. La profondità della cricca è stata misurata mediante microscopio ottico a 100 X ed acquisizione digitale delle immagini. Le prove per il rilievo della velocità di propagazione sono state eseguite a tre diversi rapporti di ciclo $R=0.1$, $R=0.4$ ed $R=0.7$ ad una frequenza di 30 Hz.

Al rapporto di ciclo $R=0.1$ è stata anche eseguita una prova mediante la metodologia ΔK -decreasing (ASTM E647) per misurare la soglia di propagazione del materiale. Le prove per la misura della soglia hanno restituito un $\Delta K_{th} = 70 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$.

I risultati delle curve di propagazione ai diversi rapporti di ciclo sono stati analizzati mediante l'equazione di Forman mediante il programma ESACRACK [4]. Il risultato dell'interpolazione dei dati sperimentali è riportato in Fig. 3.

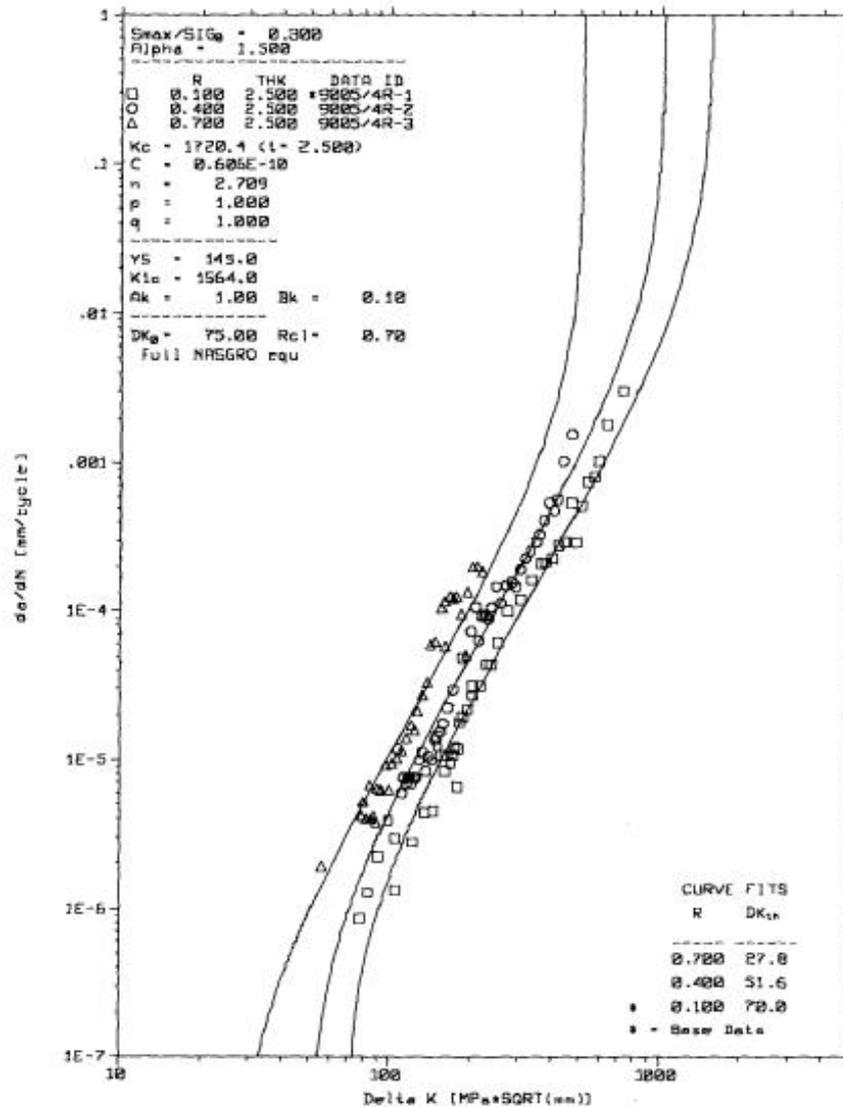


Figura 3 -Curva di propagazione

3.2 Curve S-N della giunzione saldata

Le curve di fatica della giunzione saldata sollecitata nelle due diverse condizioni di carico sono state ottenute sollecitando i provini ad un carico sinusoidale ($R=0.1$) ad una frequenza di 30 Hz. Il limite di fatica è stato ottenuto mediante sequenze di 'Stair-case' breve. L'analisi dei risultati del tratto a termine è stata eseguita in accordo con ASTM E739-91. Le curve di fatica risultanti sono riportate in Fig. 4.

I risultati sperimentali sono stati espressi in termini di sollecitazioni agenti sulla sezione di gola della saldatura rispettivamente pari a 138.75 mm^2 per il provino LO, 79.6 mm^2 per il provino TR e 88.4 mm^2 per il provino SH.

E' immediato notare come le proprietà a fatica del giunto sollecitato in direzione trasversale al cordone siano notevolmente minori delle curve relative a $\sigma_{//}$ e ad $\tau_{//}$. In particolare il giunto in direzione TR ha mostrato una serie di rotture "anomale", caratterizzate cioè da una durata a fatica più bassa degli altri provini. Poiché la successiva osservazione frattografica ha mostrato che tali rotture precoci erano caratterizzate dalla presenza di difetti particolarmente grandi, l'analisi dei dati del tratto a termine è stata in questo caso eseguita sia considerando tutte le prove sia tralasciando i dati relativi a provini con difetti macroscopici.

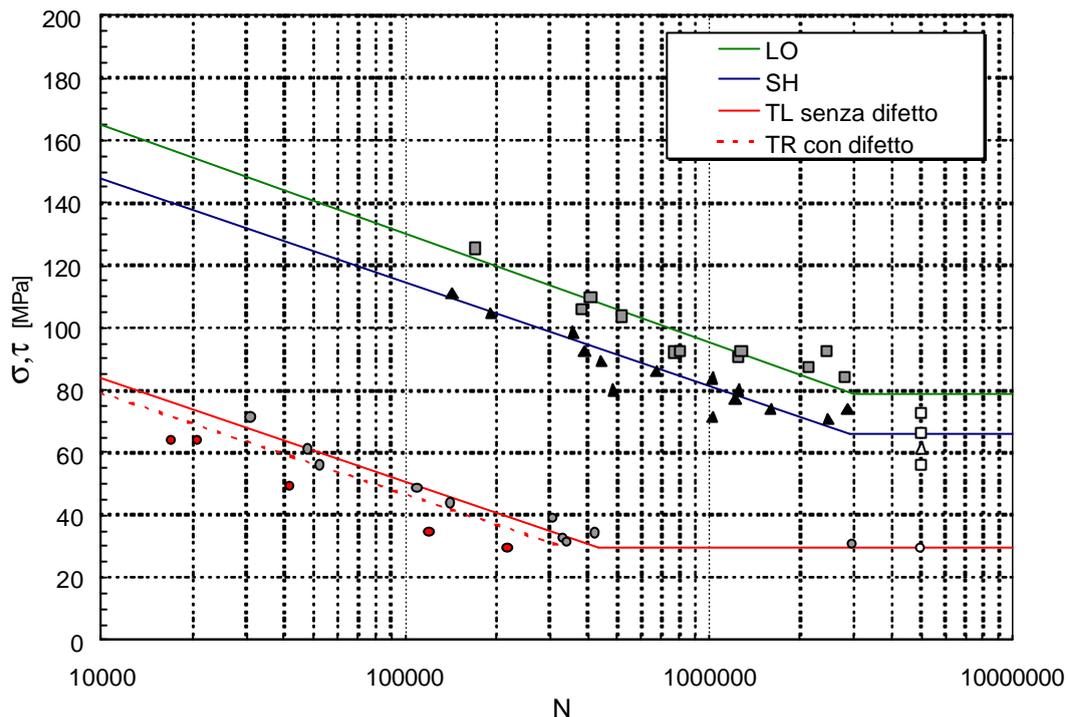


Figura 4

Resistenza a fatica della giunzione saldata soggetta a sforzo $\sigma_{//}$ (curva LO), a sforzo $\tau_{//}$ (curva SH) ed a sforzo σ^{\wedge} (curva TR).

4. Analisi del 'LAP-JOINT'

Le rilevazioni sperimentali hanno mostrato come sollecitando il giunto come un 'lap-joint' si abbiano delle proprietà a fatica estremamente basse. Ciò è dovuto al fatto che il 'lap-joint' stesso rappresenta una cricca [1,2]. Si è quindi deciso di studiare in modo più particolareggiato il comportamento del giunto in termini di propagazione di cricche dall'apice del 'lap-joint'.

4.1 Analisi frattografiche

Le analisi frattografiche hanno mostrato la propagazione della frattura avvenga sostanzialmente su un piano inclinato di circa 80° rispetto all'asse del provino, suggerendo la presenza di una propagazione mista della singolarità del lap-joint.

La caratteristica più importante emersa dall'indagine frattografica è la presenza lungo l'apice del lap-joint di micro-soffiature e difetti con forma assimilabile ad un semi-ellisse (Fig. 5).

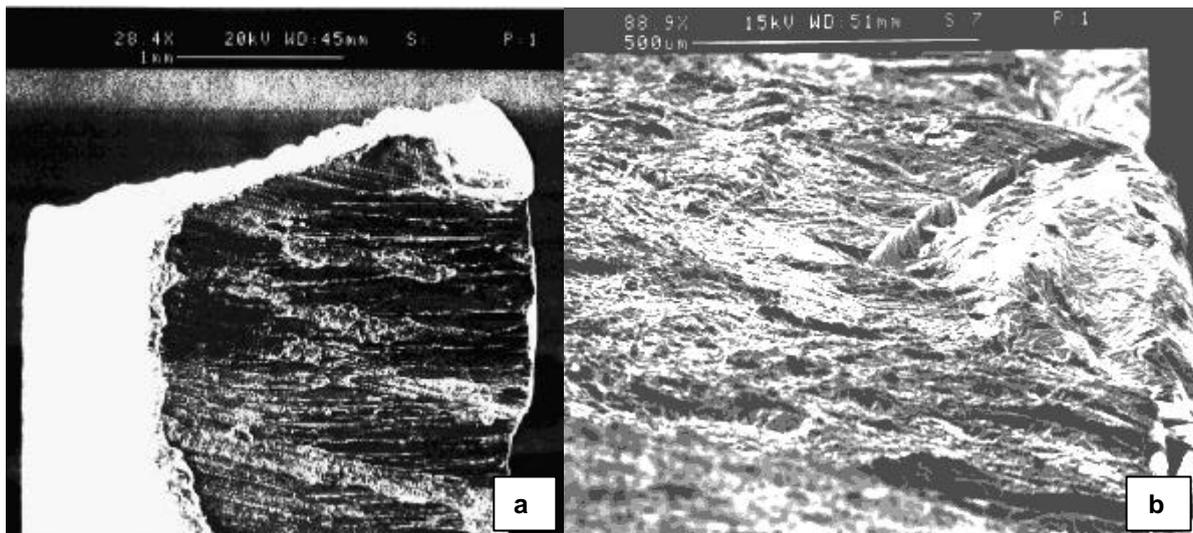


Figura 5: Superfici di frattura dei 'lap-joints': a) il piano di propagazione è inclinato rispetto all direzione di carico; b) particolare dei difetti all'apice della singolarità.

Dato il numero elevato di difetti è stato necessario darne una descrizione statistica delle loro dimensioni basata su un gran numero di osservazioni. Per tale motivo è stata dapprima fotografata (x100) la superficie di frattura di tutti i provini, procedendo poi alla misura di tutte le zone identificabili come un difetto.

Per la successiva analisi statistica le profondità dei difetti sono state analizzate con una distribuzione di Weibull. Si è preferito adottare dapprima tale analisi, invece delle indagini basate sulla statistica dei valori estremi, per poter avere indicazioni attendibili anche sulla dimensione dei difetti minore. I percentili 2.5% e 97.5%, considerati come valori caratteristici della popolazione, sono risultati 0.08 e 0.50 mm.

Una successiva indagine effettuata campionando i difetti massimi ed analizzando i dati con la distribuzione LEVD [5, 6], ha permesso di stimare il difetto massimo caratteristico per 100 mm di saldatura, pari a 0.71 mm.

4.2 Analisi FEM

E' stata effettuata l'analisi FEM del provino di saldatura tra lamiera e lamiera con sollecitazione normale e perpendicolare al cordone allo scopo di determinare il SIF in assenza ed in presenza di difetto (Fig. 6) In particolare sono state utilizzate mesh bidimensionali per modellare la cricca nella zona di sovrapposizione del materiale base.

Nelle mesh bidimensionali, per discriminare i modi di propagazione si sono usati modelli analitici basati sulle quantità *classiche* degli elementi finiti (spostamenti dei nodi e sforzi): quindi per ben approssimare la singolarità all'apice della cricca, la mesh (costituita da elementi *quarter point*) ha dovuto essere notevolmente infittita per consentire la valutazione diretta del K totale attraverso l'integrale J. La modellazione del difetto all'apice della singolarità del lap-joint è stata eseguita sulla scorta delle indicazioni ricavate da alcune sezioni lappate che avevano mostrato un angolo caratteristico di circa 56° (Fig. 6).

Per valutare la variabilità del limite di fatica in presenza di difetti nel cordone di saldatura sono state realizzate tre mesh bidimensionali, recanti difetti inclinati di 56° di lunghezza rispettivamente 0.08mm , 0.50mm e 0.71 che costituiscono le dimensioni caratteristiche dei determinate tramite l'analisi statistica. Poiché l'analisi FEM ha confermato la presenza di un modo misto di propagazione, la valutazione dello SIF è stata completata calcolando anche il $K_{\theta\theta}$ corrispondente al massimo sforzo circonferenziale all'apice della cricca.

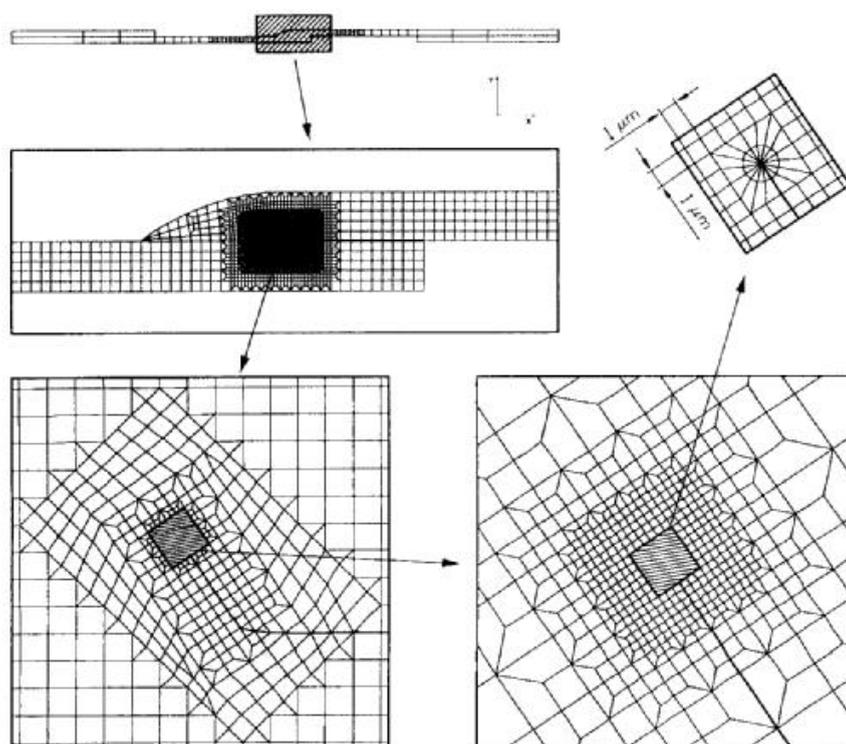


Figura 6: Modellazione del 'lap-joint' con un difetto all'apice.

In Tab.1 sono riportati i valori di K_I , K_{II} e $K_{\theta\theta}$ calcolati in assenza ed in presenza dei difetti sopracitati. I risultati delle analisi FEM si riferiscono ad uno sforzo nominale σ_{\perp} di 1 MPa.

Tab.1: Valori dei fattori di concentrazione degli sforzi con e senza difetto.

	senza difetto	difetto 0.08 mm	difetto 0.50 mm	difetto 0.71 mm
K_I	0.908	2.275	3.337	3.733
K_{II}	1.062	0.365	0.800	1.221
$K_{\theta\theta}$	1.793	2.360	3.600	4.250

La presenza dei difetti porta ad un incremento notevole (maggiore del 200% nel caso del difetto estremo) del $K_{\theta\theta}$ all'apice del 'lap-joint'. Tale effetto non è ancora stato descritto in letteratura per questo tipo di geometria.

Tali valori del SIF hanno permesso, sulla base del ΔK_{th} rilevato sperimentalmente ad $R=0.1$, di stimare il limite di fatica della giunzione TR. I limiti di fatica sono rispettivamente $\sigma_{Fn}(a2.5\%) = 33.00$ MPa, che sovrastima del 10.57% limite di fatica sperimentale e $\sigma_{Fn}(a97.5\%) = 21.63$ MPa, che lo sottostima del 27.53%.

La Fig.7 riporta tali risultati sul diagramma di Woehler ottenuto sperimentalmente. Si può quindi annotare come le proprietà a fatica del giunto siano fortemente influenzate dalla presenza dei difetti.

Ulteriore conferma della bontà dell'analisi viene dalla previsione della giacitura del piano di propagazione (compresa tra -73° e -80°) in buon accordo con le previsioni sperimentali.

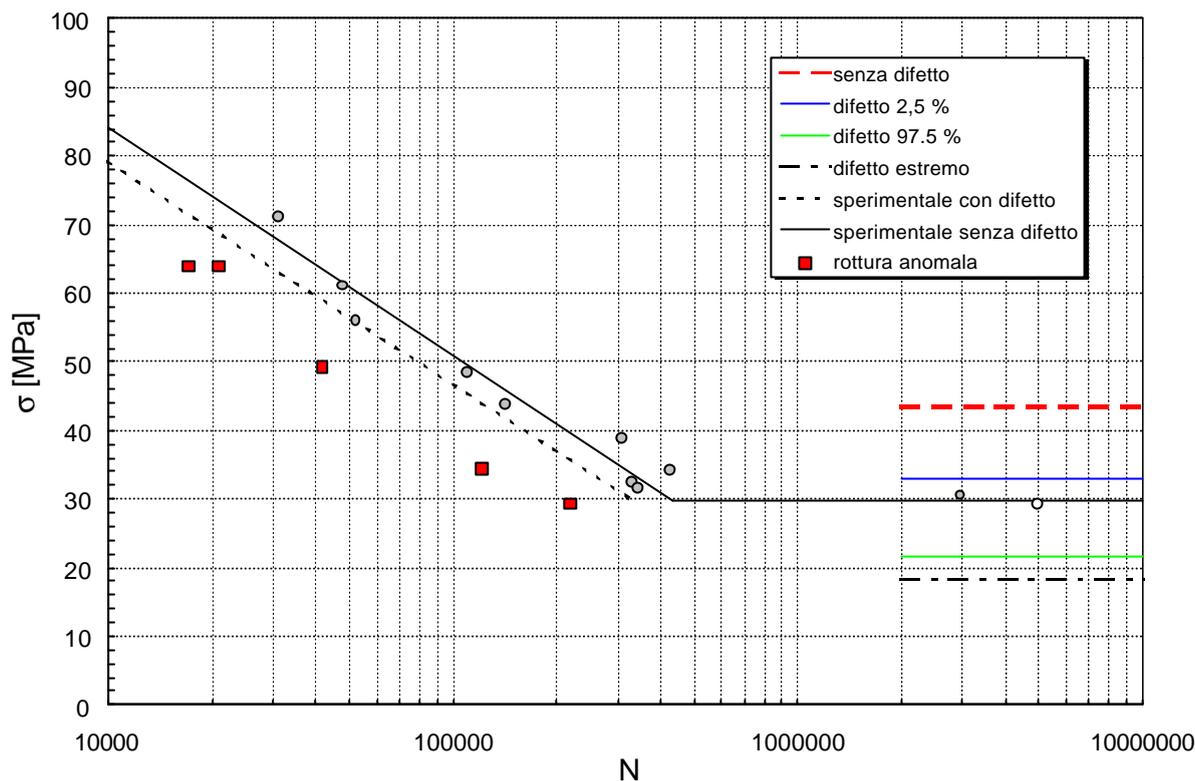


Figura 7: Confronto tra i limiti di fatica ottenuti per via sperimentale e numerica

5. Conclusioni

In questo lavoro si è esaminato il comportamento a fatica di giunzioni correnti in lega d'alluminio, evidenziando che la minore resistenza è propria del 'lap-joint'. Si è inoltre proposto un metodo in grado di stimare la resistenza a fatica del 'lap-joint' in presenza dei difetti tipici della giunzione valutati con metodi statistici applicati alle rilevazioni frattografiche.

Bibliografia

- [1] Reedy E.D. Jr, Guess T.R., "Composite-to-metal Tubular Lap-joints: Strength and Fatigue Resistance", International Journal of Fracture, Vol.63, pagg.351-367, **1993**.
- [2] Murakami Y., *Stress Intensity Factor Handbook*, The Society of Materials Sciences of Japan, Pergamon Press, **1987**
- [3] L. Barduca, S. Coialbu, "Fatica e meccanica della frattura di strutture saldate in lega leggera d'alluminio", Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, **1997**.
- [4] ESACRACK User's Manual, European Space and Technology Centre, Structures & Mechanics Division, **1995**.
- [5] Murakami Y., "Inclusion Rating by Statistics of Extreme Values and its Application to Fatigue Strength Prediction and Quality Control of Materials", Journal of Research of the National Institute of Standard Technology, Vol.99, No.4, **1994**.
- [6] Rabolini F., "Fatica e meccanica della frattura di strutture saldate in lega d'alluminio", Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, **1998**.