

## UNA SINTESI DELLE PROPRIETA' DI RESISTENZA A FATICA DI GIUNTI SALDATI DI GEOMETRIA COMPLESSA BASATA SULLA DENSITA' DI ENERGIA DI DEFORMAZIONE LOCALE

M. Zappalorto<sup>a</sup>, F. Berto<sup>a</sup>, P. Lazzarin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali, Università di Padova, Stradella San Nicola 3, 36100 Vicenza, e-mail: zappalorto@gest.unipd.it*

### SOMMARIO

Un recente criterio basato sul valore medio della densità di energia di deformazione (SED) in un volume di controllo è applicato a diverse serie di dati sperimentali tratti dalla letteratura, relativi a giunti saldati di geometria complessa realizzati in acciaio. Il volume di controllo è rappresentato da un settore circolare di raggio pari a 0.28 mm, centrato sul piede o sulla radice dei cordoni di saldatura. Entrambe le regioni sono modellate come intagli V non raccordati con differenti angoli di apertura.

La densità di energia di deformazione viene valutata direttamente da modelli agli elementi finiti tridimensionali. I dati sperimentali, riconvertiti in termini energetici, si posizionano all'interno di una banda di dispersione recentemente proposta in letteratura. La banda sintetizzava più di 650 dati sperimentali relativi a giunti saldati con cordone d'angolo, con rotture innescate indifferentemente al piede o alla radice dei cordoni di saldatura.

### ABSTRACT

A recent criterion based on the local strain energy density (SED) averaged over a given control volume is applied to well-documented experimental data taken from the literature, all related to steel welded joints of complex geometry. This small size volume embraces the weld root or the weld toe, both regions being modelled as sharp (zero notch radius) V-notches with different opening angles.

The SED is evaluated from three-dimensional finite element models by using a circular sector with a radius equal to 0.28 mm. The data expressed in terms of the local energy fall in a scatter band recently reported in the literature, based on about 650 experimental data related to fillet welded joints made of structural steel with failures occurring at the weld toe or at the weld root.

### 1. INTRODUZIONE

Nella letteratura recente è stato ampiamente dimostrato come la resistenza a fatica di giunzioni saldate ad arco in acciaio da costruzione o in lega leggera possa essere sintetizzata in termini di fattori di intensificazione delle tensioni o "Notch Stress Intensity Factors" (N-SIFs) [1-3]

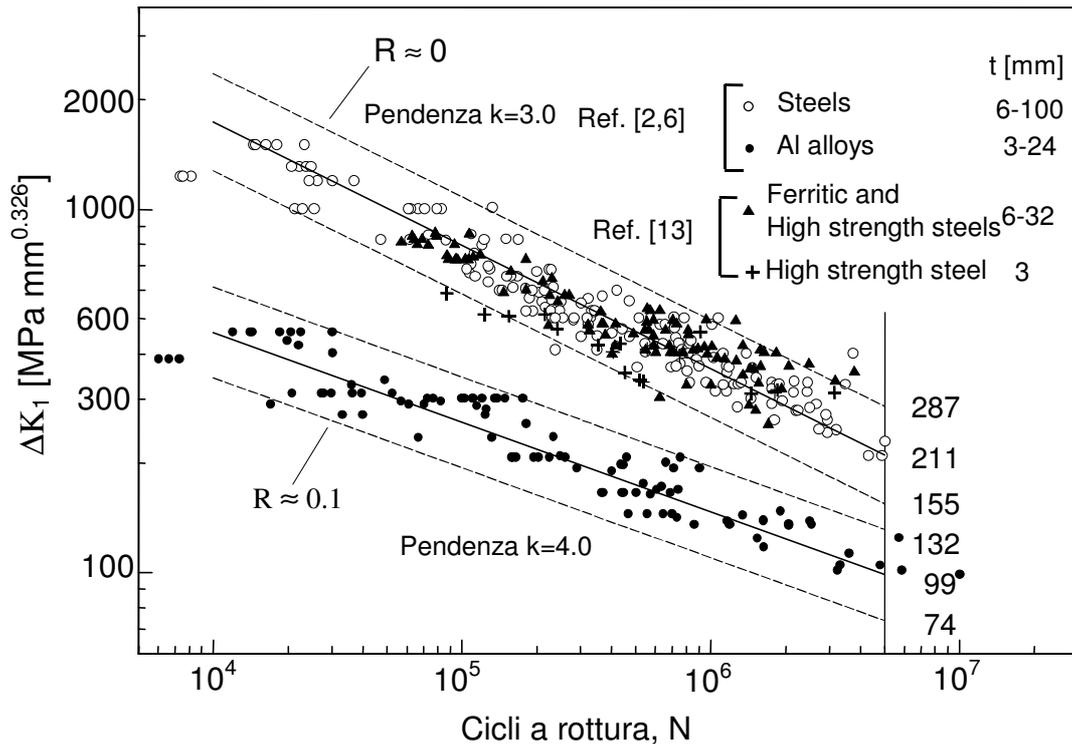
Il problema della variabilità dei raggi di raccordo al piede e alla radice dei cordoni di saldatura viene superato nell'approccio N-SIF modellando i cordoni come intagli acuti a V; le distribuzioni di tensione in corrispondenza dei punti critici presentano quindi un carattere asintotico e gli N-SIF quantificano proprio la loro intensità. Poiché le distribuzioni sono sensibili alle dimensioni assolute del giunto, l'effetto scala è interamente conglobato nel valore dell'N-SIF [1-3].

Quando l'angolo di apertura  $2\alpha$  dell'intaglio è abbastanza grande da rendere il modo II non singolare ( $2\alpha > 102$  gradi, condizione generalmente soddisfatta in tutti i giunti con cordoni d'angolo), il comportamento a fatica in presenza di sollecitazioni di trazione o flessione dipende solo dal fattore di intensificazione di modo I,  $\Delta K_I$  [1-3]. Tale parametro, che è naturale pensare idoneo a controllare la fase di innesco delle cricche di fatica, è invece risultato efficace anche nell'operare una sintesi della vita finale dei giunti saldati; ciò accade perché nei campioni testati in laboratorio la maggior parte della

vita a fatica è spesa come innesco e propagazione di cricche corte, localizzate all'interno della zona di singolarità governata dai campi asintotici iniziali [3].

Gli N-SIF permettono anche di superare il complesso problema legato alla propagazione di cricche multiple e della loro possibile interazione su piani diversi, fenomeni variabili in funzione del tipo di sollecitazione e delle irregolarità presenti al piede dei cordoni.

La figura 1 riassume numerosi dati sperimentali in funzione del fattore di intensificazione delle tensioni di modo I; la sintesi riguarda giunti a croce e a T, soggetti a trazione e flessione e caratterizzati da uno spessore dei piatti principali variabile tra 3 e 100 mm. La variabilità dei piatti trasversali risultava ancora più pronunciata, con uno spessore variabile tra 3 e 220 mm. Le rotture si manifestavano sempre al piede dei cordoni di saldatura, in presenza di un angolo apertura di 135 gradi tra piatti principali e superficie dei cordoni.



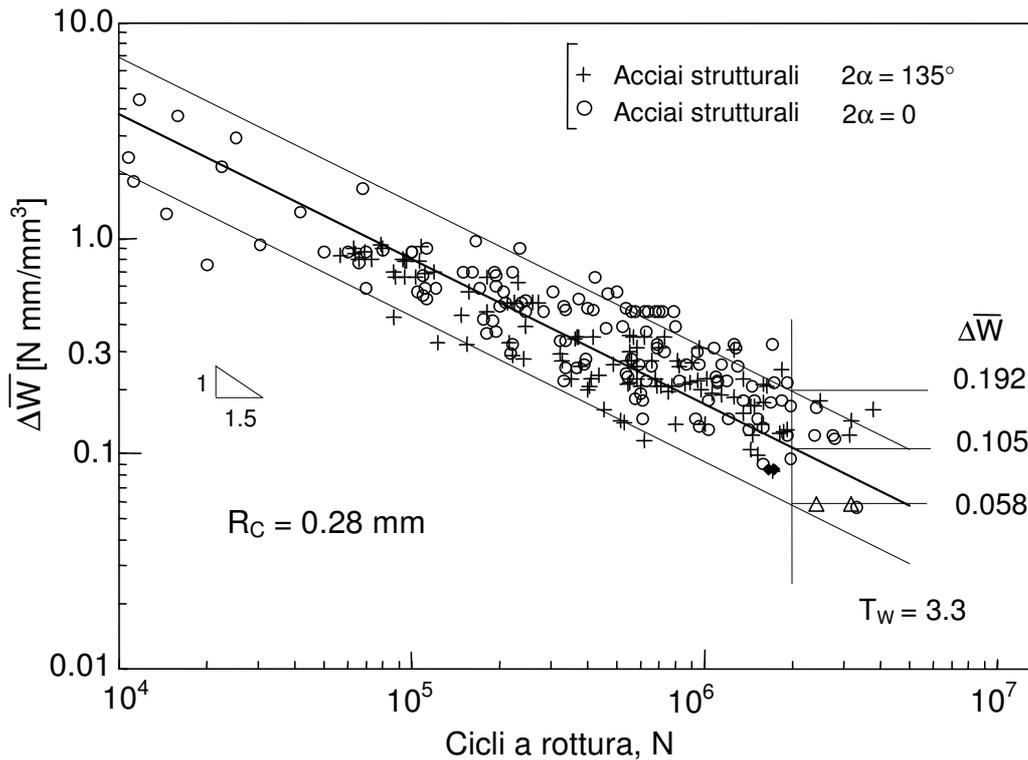
**Figura 1.** Resistenza a fatica di giunti saldati in acciaio e lega leggera in funzione del fattore di intensificazione delle tensioni di modo I. Geometrie a croce e a T, con cordone portante. Angolo di apertura di 135 gradi;  $t$  spessore dei piatti principali; banda di dispersione relativa a valori medi  $\pm 2$  deviazioni standard ( $P_S=2.3-97.7\%$ ). La figura è tratta dalla referenza [7].

Dal punto di vista teorico, la banda di dispersione riportata in figura 1 non può essere estesa a giunzioni saldate che manifestano rotture alla radice dei cordoni, né a giunzioni con angoli di apertura al piede sensibilmente diversi da 135°. Questo è dovuto al fatto che le unità di misura degli N-SIF cambiano proprio in funzione dell'angolo di apertura.

Il problema è stato superato in recenti lavori [4-9] usando come parametro rappresentativo della resistenza a fatica un valore medio della densità di energia di deformazione  $\Delta W$  calcolata in un volume finito adiacente al piede o alla radice dei cordoni. In linea di principio tale energia è funzione dei fattori di intensificazione di modo I e di modo II nei casi piani [4], di Modo I, II e III nel caso di sollecitazioni multiassiali [6,9].

Una banda in termini di  $\Delta W$  è stata inizialmente proposta nelle referenze [4,5] sulla base di circa 300 dati sperimentali relativi ad acciai da costruzione saldati ed è stata successivamente verificata utilizzando altri 400 dati che si sono resi disponibili nel tempo [7].

La banda inizialmente ottenuta con dati di resistenza a fatica relativi a giunti con cordoni d'angolo è stata recentemente applicata anche ai giunti saldati testa a testa [8]. Una sintesi parziale è presentata in figura 2 relativamente a giunti realizzati con acciai da costruzione, interessati da rotture al piede e alla radice dei cordoni di saldatura [7].



**Figura 2.** Resistenza a fatica in funzione del valore medio della densità di energia di deformazione presente in un settore semicircolare di raggio  $R_C$  centrato sull'apice dell'intaglio a V [7]. Nel caso di giunti saldati realizzati con acciai da costruzione il raggio critico  $R_C$  vale 0.28 mm.

L'indice  $T_w$  che fornisce la larghezza di banda riferita a valori medi +/- due deviazioni standard vale 3.3. Passando dal range di energia a un range di tensione locale equivalente e ai livelli di probabilità di sopravvivenza del 10-90%, l'indice scende a  $T_{\sigma} = 1.50$ , valore che caratterizza la banda normalizzata di Haibach [10].

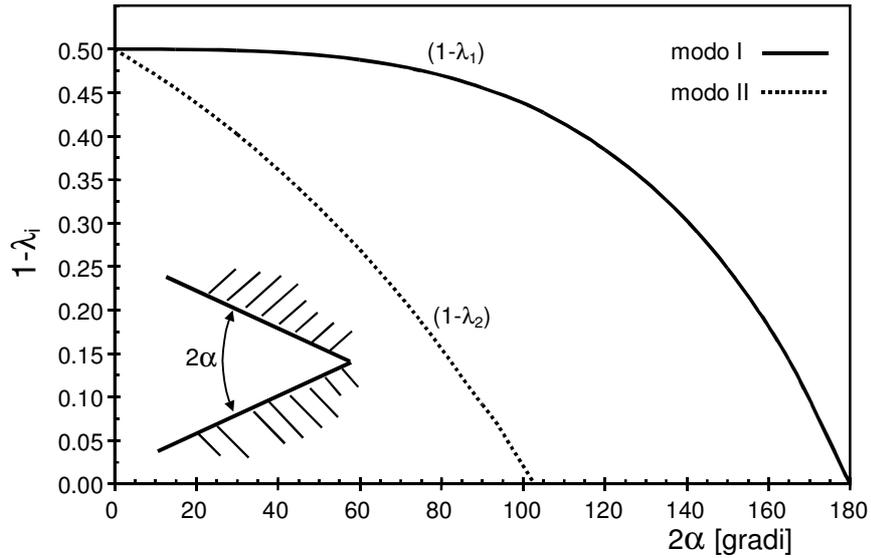
L'obiettivo del presente lavoro è quello estendere l'uso del criterio dell'energia locale a un'elevata quantità di dati sperimentali, già analizzati nella precedente letteratura [11-13], relativi a giunti saldati in acciaio, tutti caratterizzati da geometrie tridimensionali complesse, e di confrontarli con una banda di dispersione già riportata in lavori precedenti. Tale banda è stata ottenuta rianalizzando all'incirca 650 dati sperimentali relativi a giunti saldati a cordone d'angolo, dove le cricche di fatica innescavano in corrispondenza del piede o della radice del cordone di saldatura [7].

## 2.PREMESSE ANALITICHE.

Il grado di singolarità  $1-\lambda_i$  dei campi di tensione in prossimità di intagli a V non raccordati varia in funzione dell'angolo di apertura (figura 3), riducendosi progressivamente rispetto al caso di una cricca dove il grado di singolarità è 0.5 per i modi di sollecitazione I e II [1,14]; gli N-SIF quantificano proprio l'intensità delle distribuzioni di tensione asintotiche presenti di fronte all'apice dell'intaglio.

In un sistema in coordinate polari  $(r, \theta)$  avente l'origine centrata sull'apice (Figura 4), le distribuzioni lineari elastiche delle tensioni possono essere espresse in forma generale nella forma:

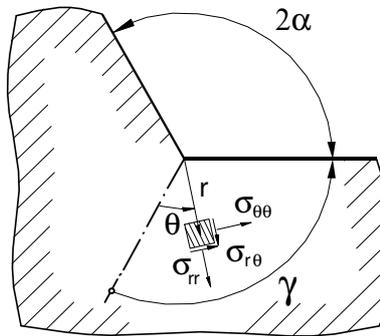
$$\begin{aligned} \text{Modo I} \quad \sigma_i^{(1)}(r, \theta) &= K_1^N \cdot \tilde{\sigma}_i^{(1)}(\theta) \cdot r^{\lambda_1-1} \\ \text{Modo II} \quad \sigma_i^{(2)}(r, \theta) &= K_2^N \cdot \tilde{\sigma}_i^{(2)}(\theta) \cdot r^{\lambda_2-1} \end{aligned} \tag{1}$$



**Figura 3.** Grado di singolarità  $1-\lambda_i$  dei campi di tensione in prossimità di intagli a V non raccordati in funzione dell'angolo di apertura.

dove  $K_1^N, K_2^N$ , sono gli N-SIF di modo I e II,  $\sigma_i(\theta)$  sono le funzioni angolari e, infine,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  gli autovalori del problema lineare elastico.  
Vale per gli N-SIF la seguente definizione [15]:

$$K_1^N = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0^+} [\sigma_{\theta\theta}(r,0)] r^{1-\lambda_1} \quad K_2^N = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0^+} [\sigma_{r\theta}(r,0)] r^{1-\lambda_2} \quad (2)$$



**Figura 4.** Sistema di coordinate polari centrato sull'apice dell'intaglio.

**Tabella 1.** Valore dei parametri presenti nelle equazioni (1-3) ottenuti con l'ipotesi di Beltrami e con un coefficiente di Poisson  $\nu=0.3$ .

$2\alpha/\pi$ [rad]	$\gamma/\pi$ [rad]	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$I_1$	$I_2$
0	1	0.5000	0.5000	0.8450	2.1450
3/4	5/8	0.6736	1.3021	0.6201	1.1505

Nell'ipotesi di deformazione piana, l'energia di deformazione mediata su un settore semicircolare di raggio  $R_C$  che abbraccia l'apice dell'intaglio può essere espressa mediante la relazione [4-9]:

$$\Delta \bar{W} = \frac{c_w}{E} \left\{ \frac{I_1}{4\lambda_1\gamma} \left[ \frac{\Delta K_1^N}{R_C^{1-\lambda_1}} \right]^2 + \frac{I_2}{4\lambda_2\gamma} \left[ \frac{\Delta K_2^N}{R_C^{1-\lambda_2}} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

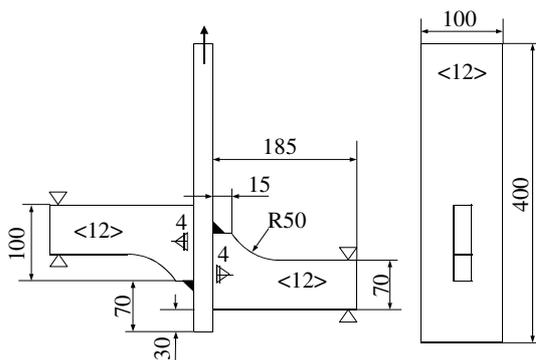
dove il coefficiente  $c_w$  permette di tenere conto dell'influenza del rapporto nominale di ciclo  $R$  nel solo caso di giunti soggetti a distensione post-saldatura. Tutti gli altri parametri in gioco sono riportati in Tabella 1 con riferimento alla densità di energia totale di deformazione (ipotesi di Beltrami) e a un coefficiente di Poisson  $\nu=0.3$ .

Il parametro  $c_w$ , definito in condizioni lineari elastiche, può essere ottenuto per mezzo delle seguenti relazioni [6]:

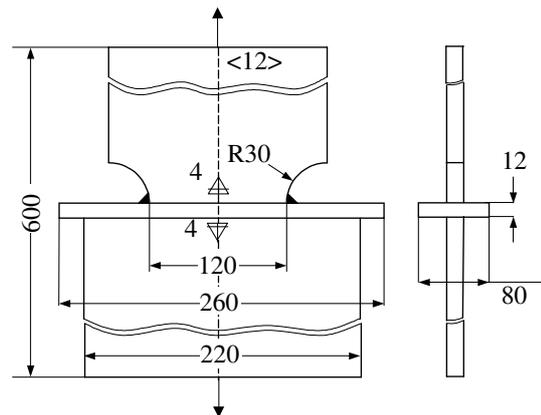
$$c_w(R) = \begin{cases} \frac{1+R^2}{(1-R)^2} & \text{se } -1 \leq R < 0 \\ \frac{1-R^2}{(1-R)^2} & \text{se } 0 \leq R \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

Passando da  $R=0$  a  $R=-1$ ,  $c_w$  scende da 1.0 a 0.5; ad un dimezzamento della densità di energia locale corrisponde un aumento della resistenza a fatica in termini di tensione locale di un fattore  $1/.707=1.41$ , simile al coefficiente empirico 1.33 suggerito dalla CNR UNI 10011. Ovviamente, se i giunti non subiscono alcun trattamento di distensione post-saldatura, la dipendenza da  $R$  scompare e il parametro  $c_w$  deve considerarsi unitario. E' noto infatti che nelle strutture reali soggetti ad elevati stati di tensioni residue la resistenza a fatica è sostanzialmente indipendente dal rapporto nominale di ciclo [16].

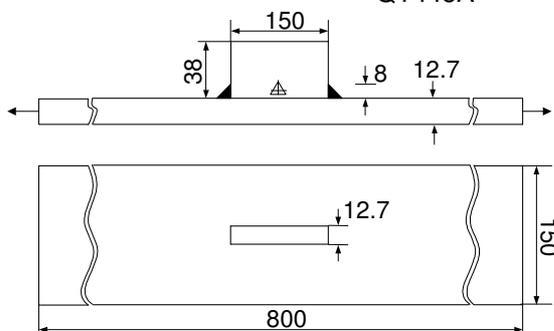
Fricke and Doerk, 2006



Fricke and Doerk, 2006

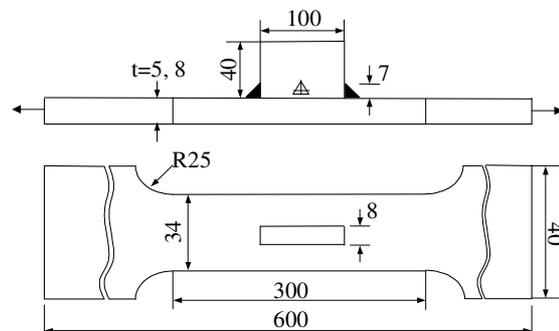


Maddox, 1982



Mild steel  
BS 4360 Grade 50  
S70  
QT445A

Lihavainen and Marquis, 2003  
S355 steel

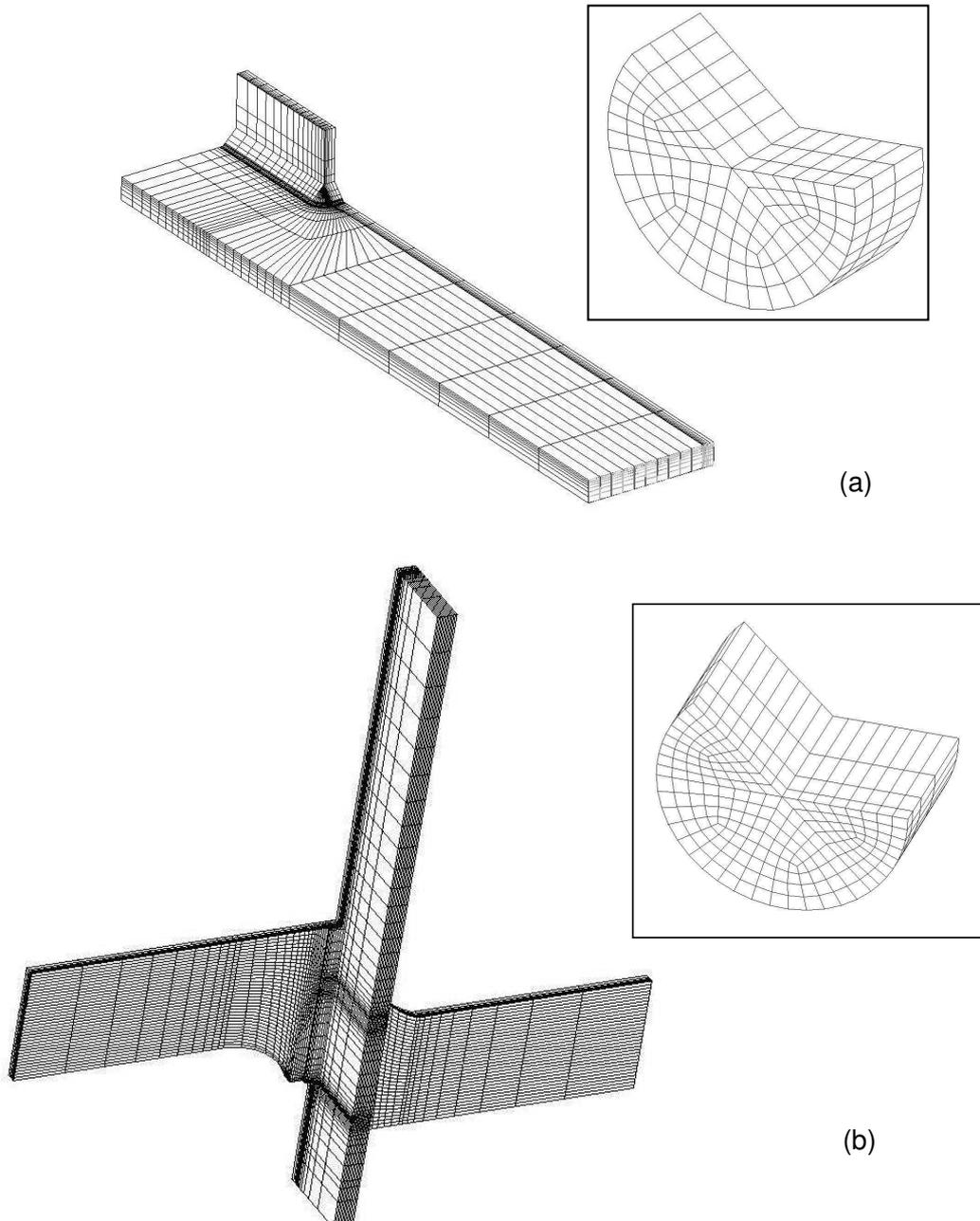


**Figura 5.** Geometrie dei giunti saldati analizzati. I dati originali fanno riferimento alle referenze [13-15]. Tutte le dimensioni sono in mm.

### 3. RESISTENZA A FATICA DI GIUNTI SALDATI DI GEOMETRIA COMPLESSA BASATA SULLA DENSITÀ DI ENERGIA DI DEFORMAZIONE LOCALE

Sono stati riconsiderati alcuni dati sperimentali relativi a particolari strutturali saldati in acciaio già analizzati in precedenti lavori [11-13]; i principali parametri geometrici così come le condizioni di carico e di vincolo erano perfettamente definite nei lavori originali e sono rappresentati schematicamente in figura 5.

La densità di energia di deformazione è stata ottenuta per mezzo di analisi agli elementi finiti tridimensionali eseguite con il software Ansys 9.0, modellando il volume di controllo come un settore circolare tridimensionale di raggio  $R_c=0.28$  mm, che abbraccia il piede del cordone di saldatura (figura 6).

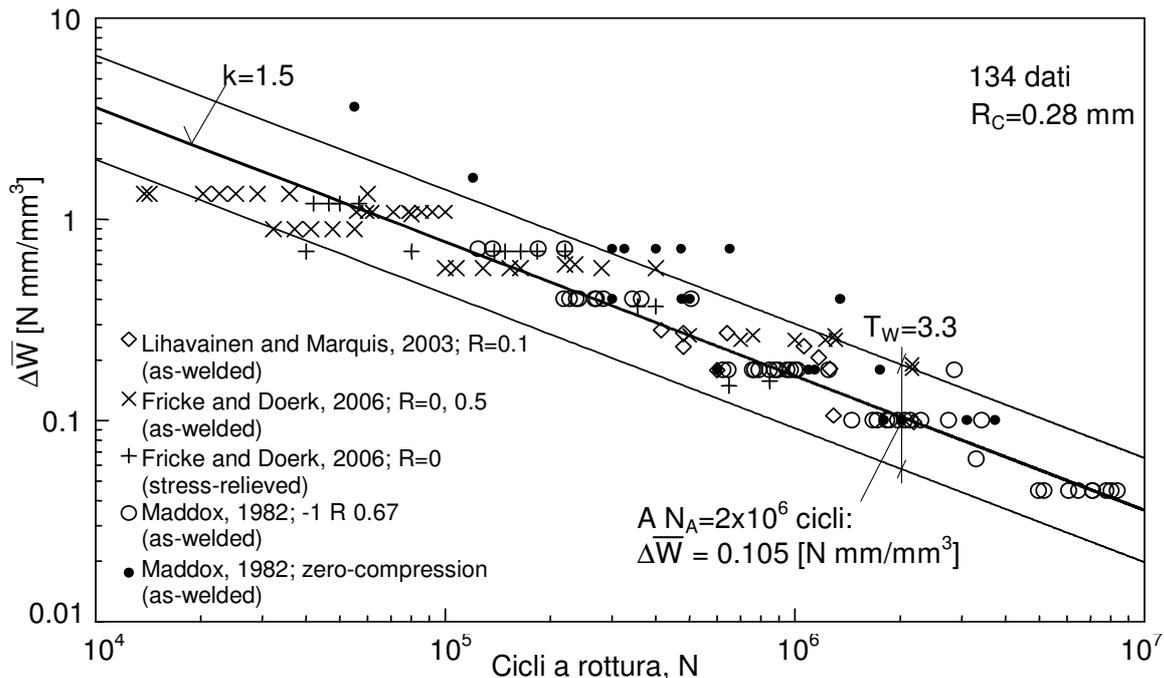


**Figura 6.** Esempio di modellazione del giunto ad irrigidimento longitudinale già analizzato da Maddox [11] (a) e del giunto cruciforme già analizzato da Fricke e Doerk.[13] (b); modelli complessivi e particolari relativi alla modellazione del volume strutturale.

I dati fanno riferimento sia a giunti sottoposti a trattamento di distensione delle tensioni residue (*stress-relieved*) con  $R=0$ , sia a giunti testati allo stato *as-welded* con differenti rapporti nominali di carico ( $-\infty$   $R$  0.67); nella sintesi quindi il coefficiente correttivo  $c_W$  è sempre stato considerato unitario.

In figura 7, i dati sperimentali riconvertiti in termini energetici sono confrontati con un banda di dispersione già riportata nella referenza [5]; l'accordo è molto soddisfacente, tranne per alcuni dati relativi alle serie già analizzate da Maddox [11] e caratterizzati da un rapporto di ciclo pari a  $R=-\infty$  (pura compressione).

L'indice di dispersione  $T_W$  relativo alle probabilità di sopravvivenza  $P_S=2.3\%$  and  $97.7\%$  è risultato pari a 3.3 e se riconvertito in termini di tensione e probabilità di sopravvivenza  $P_S=10\%$  and  $90\%$  risulta 1.5, in perfetto accordo con la banda normalizzata di Haibach [10].



**Figure 5.** Resistenza a fatica di giunti saldati in acciaio strutturale di geometria complessa in termini di densità di energia locale; I dati originali sono riportati nelle referenze [11-13]. Confronto con la banda di dispersione proposta da Lazzarin *et al.* [5] ( $P_S=2.3-97.7\%$ ).

## 5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state considerate diverse serie di dati di resistenza a fatica tratti dalla letteratura e relativi a unioni saldate in acciaio di geometria complessa. Per tali serie risultavano precisati tutti i parametri che consentono di descrivere con precisione la geometria locale in corrispondenza del piede e della radice dei cordoni di saldatura. I dati sperimentali sono stati rianalizzati utilizzando un criterio locale basato sul valore medio della densità di energia di deformazione, criterio già messo a punto e applicato a giunti di geometria diversa, soggetti a trazione o flessione. Il metodo energetico consente di sintetizzare dati di resistenza a fatica indipendentemente dal punto di innesco delle cricche e dall'angolo di apertura al piede dei cordoni.

I dati di resistenza a fatica, riconvertiti in termini di densità di energia locale, sono stati confrontati con una banda di sintesi proposta nella precedente letteratura per giunti saldati soggetti a flessione o trazione.

L'accordo con le bande di sintesi è risultato soddisfacente. L'indice di dispersione, se riconvertito in termini di tensione media locale, piuttosto che in termini di densità media di energia locale, appare perfettamente in linea con le indicazioni fornite dalla banda normalizzata di Haibach.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Lazzarin P, Tovo R. A notch stress intensity approach to the stress analysis of welds. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1998; 21:1089-1103.
- [2] Atzori B, Lazzarin P, Tovo R. From the local stress approach to fracture mechanics: a comprehensive evaluation of the fatigue strength of welded joints. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1999; 22:369-382.
- [3] 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.
- [4] Lazzarin P, Ambardi R. A finite-volume-energy based approach to predict the static and fatigue behaviour of components with sharp V-shaped notches. *International Journal of Fracture*. 2001; 12:275-298.
- [5] Lazzarin P, Lassen T, Livieri P. A Notch Stress Intensity approach applied to fatigue life predictions of welded joints with different local toe geometry. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2001; 26:49-58.
- [6] Lazzarin P, Sonsino CM, Ambardi R. A Notch Stress Intensity approach to predict the fatigue behaviour of T butt welds between tube and flange when subjected to in-phase bending and torsion loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2004; 27:127-141.
- [7] Livieri P, Lazzarin P. Fatigue strength of steel and aluminium welded joints based on generalised stress intensity factors and local strain energy values. *International Journal of Fracture*. 2005; 133:247-276.
- [8] Lazzarin P, Berto F, Rada D. Uniform fatigue strength of butt and fillet welded joints in terms of the local strain energy density. *Proc. Fatigue 2006, Atlanta, USA*.
- [9] Lazzarin P, Livieri P, Berto F, Appalorto M. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007; in press (available on line).
- [10] Haibach E. *Service fatigue strength – methods and data for structural analysis*. Springer Verlag, Berlin, 2002.
- [11] Maddox SJ. Influence of tensile residual stresses on the fatigue behavior of welded joints in steel. *ASTM STP*. 1982; 776: 63-96.
- [12] Lihavainen VM, Marquis G. Fatigue strength of a longitudinal attachment improved by ultrasonic impact treatment. *IIW*. 2003; Document III-1990-03.
- [13] Fricke W, Doerk O. Simplified approach to fatigue strength assessment of fillet-welded attachment ends. *International Journal of Fatigue*. 2006; 28:141-150.
- [14] Williams ML. Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension. *ASME Journal of Applied Mechanics*. 1952; 19: 526-528
- [15] Gross R, Mendelson A. Plane elastostatic analysis of V-notched plates. *International Journal of Fracture Mechanics*. 1972; 8:267-327.
- [16] Atzori B. Trattamenti termici e resistenza a fatica delle strutture saldate. *Rivista Italiana della Saldatura*. 1983; 1:3-16.