



## Verifica a fatica dei giunti saldati sulla base di misure di deformazione locale

V. Dattoma, R. Nobile, F.W. Panella

*Università del Salento, Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Lecce; vito.dattoma@unile.it*

**RIASSUNTO.** Lo studio della resistenza a fatica delle giunzioni saldate rappresenta un campo di prova molto interessante dal punto di vista scientifico, con ricadute pratiche altrettanto importanti. Si tratta in generale di fornire dei metodi di verifica e progetto deterministici, come è proprio dell'ingegneria, per prevedere il comportamento meccanico di un materiale che, quando è sotto forma di saldatura, cambia le sue proprietà meccaniche e microstrutturali rispetto al materiale base, si dispone in una geometria locale del cordone estremamente variabile e non definibile a priori, è infine affetto da campi di tensione residua non proprio trascurabili. In questo lavoro, partendo da una breve panoramica sui principali indicatori e metodi che sono stati utilizzati nel corso degli anni per la stima dello stato di sollecitazione in un giunto saldato e della vita residua a fatica, si presenta l'approccio basato sulla misura della deformazione locale che è stato seguito da diversi autori nel corso degli anni, evidenziandone i vantaggi ma anche le limitazioni rilevate attraverso le numerose attività sperimentali direttamente eseguite.

**ABSTRACT.** Fatigue resistance of welded joints represents an interesting and challenging studying field from a scientific point of view, with valuable and important practical consequences. In the specific, the main target is to establish in general the proper quantitative verification and design procedures, based on theoretical achievements. The actual procedures and standard codes are extremely useful for most engineering applications, in which elevated safety factors have to be used. On the other hand the mechanical behavior of welded material is different from the base metal; the weld bead material has different mechanical characteristics because of microstructural changes and other local effects, due to extremely variable weld toe geometry, resulting in notch effects and coupled with relevant residual stresses not to be ignored.

In this work, a brief resume of the principal design methods is primarily reported for the estimation of residual life expectancies of welded joints, leading to different engineering approaches; among them, the method based on local deformations measurements is presented as reliable verification tool, already analyzed and modified by several authors in the past. The local deformation approach has been deeply applied and verified by the authors and the main advantage and characteristics are explained, as well as the present limitations to be observed in the frame of many experimental fatigue testing activities.

**PAROLE CHIAVE.** Welded joints; Fatigue; Local Strain; Design Method.

### INTRODUZIONE

La stima della resistenza a fatica di giunzioni saldate rappresenta un problema particolarmente complesso a causa delle notevoli alterazioni introdotte dal ciclo termico di saldatura. La microstruttura del materiale cambia, favorendo generalmente un comportamento maggiormente fragile; i gradienti termici sviluppati durante il processo originano in maniera complementare campi di tensioni residue o distorsioni e disallineamenti significativi; il materiale depositato sotto forma di cordone, infine, altera la geometria locale del giunto, dando origine a una concentrazione di



tensione assimilabile ad un intaglio. Tutti questi fenomeni, che sono peculiari dei giunti saldati, vanno a complicare un fenomeno già estremamente complesso come il comportamento a fatica.

Gli effetti di questi parametri sono indistinguibili l'uno dall'altro; se da un lato è abbastanza semplice individuare il tipo di sollecitazione agente globalmente sul giunto, non altrettanto si può dire per la geometria locale dello stesso cordone, che è non definibile a priori e caratterizzata da una variabilità estrema. Se è quindi piuttosto ovvio riconoscere nello stato di sollecitazione locale al piede del cordone il principale responsabile della resistenza a fatica di un giunto, il grosso problema diventa determinare tale stato di sollecitazione, o un parametro ad esso legato, basandosi su una geometria non definibile in modo esatto. Si corre il rischio di calcolare dei parametri indicativi dello stato di sollecitazione locale relativi sì ad una geometria di riferimento sul cordone, ma in molti casi non rappresentativa della reale situazione.

Bisognerebbe poi tener conto che in ogni caso un parametro rappresentativo della sollecitazione locale, in quanto espressione del solo campo tensionale e deformativo magari anche residuo, non considera affatto le alterazioni metallurgiche introdotte nel materiale dal processo.

In questo lavoro si presenta l'approccio basato sulla misura della deformazione locale, analizzando i dati derivanti da numerose prove di fatica eseguite principalmente su giunti saldati ad arco in acciaio strutturale di varia forma e con diversi spessori delle piastre. Si presentano inoltre i primi risultati che sono stati ottenuti per giunti saldati al laser in lega di Titanio.

#### *Metodi principali utilizzati per la resistenza a fatica di giunti saldati*

I vari approcci che sono stati proposti nel corso degli anni per la valutazione della resistenza a fatica dei giunti saldati possono essere classificati sulla base della tipologia di parametro scelto per rappresentare la gravità dello stato di sollecitazione che porta alla rottura a fatica.

La scelta di un parametro affidabile per descrivere quanto accade in giunto saldato sollecitato a fatica è alquanto complicato, come testimoniato dal fatto che tuttora la soluzione adottata in molti casi è rappresentata dalla tensione nominale. Le norme internazionali [1-3] individuano infatti un certo numero di dettagli strutturali scelti tra i più significativi nella pratica corrente, fornendo per ognuno di essi un limite di fatica di riferimento espresso proprio in termini di tensione nominale: in altre parole si rinuncia a metodi di calcolo più sofisticati e dettagliati, certificando l'impossibilità di considerare in tutti i suoi aspetti l'effetto della reale geometria del giunto e dello stato di sollecitazione locale al cordone.

Tradizionalmente, si ritiene che la tensione nominale al piede del cordone venga alterata sia dalla particolare geometria globale del giunto (ossia il dettaglio strutturale codificato dalle norme), sia dagli effetti geometrici locali originati da disallineamenti o distorsioni e dalla geometria locale del cordone [4].

Negli approcci tipo hot-spot, l'idea di base è di tralasciare le complicazioni legate alla geometria locale del cordone, ma di considerare le sovrasollecitazioni indotte dalla configurazione geometrica propria del giunto. In pratica, la tensione di hot-spot viene a coincidere con la somma della tensione nominale e della componente di flessione ad essa associata. Tale tensione di hot-spot può essere valutata numericamente tramite modelli FEM della giunzione, o sperimentalmente mediante estensimetri elettrici posizionati in punti prefissati e precisati univocamente dalle procedure proposte [5-7].

Partendo da questa base comune, i vari approcci locali si differenziano grandemente per i parametri che vengono considerati: Radaj [8, 9] ha proposto di far riferimento ad una concentrazione di tensione elastica, valutata con un modello numerico in cui si assume arbitrariamente al piede del cordone un raggio di raccordo di 1 mm. Tali metodi si dimostrano particolarmente efficaci e sono attualmente ben collaudati; in particolare l'IIW ha da tempo emanato una proposta di nuova normativa europea [10], basata appunto sulla determinazione di una tensione "geometrica" di hot spot, da determinarsi sia con modelli FEM lineari, sia con misurazioni estensimetriche in due punti lontani dal raccordo sul cordone, con la quale determinare sulle curve di riferimento disponibili per la normativa vigente la vita residua a fatica. Tale proposta è estremamente innovativa e valida, nonché meno conservativa della norma ufficiale. Più recentemente, si è proposto di considerare una tensione mediata in un volume di riferimento [11] o calcolata ad una particolare distanza critica [12].

Un'altra possibile alternativa è far riferimento agli approcci basati sul fattore di intensificazione degli sforzi. La soluzione di Williams [13] che descrive il campo tensionale in corrispondenza di intagli a V acuti può essere sfruttata per determinare la gravosità del campo tensionale presente al piede del cordone, sfruttandone la similitudine geometrica con gli intagli a V acuti. Tale similitudine, proposta inizialmente da Verreman e Nie [14], è stata poi portata avanti da altri studi di Lazzarin e Tovo, Atzori e altri [15-17]. Diversi studi sono attualmente in corso per generalizzare e standardizzare questi metodi alle diverse tipologie di giunto e di carico.

Infine, un'ulteriore possibile approccio è quello di considerare comunque presente una cricca al piede del cordone; di conseguenza, la vita a fatica viene ad essere determinata dalle leggi di propagazione delle cricche [18-19]. Il fattore di



intensificazione degli sforzi, opportunamente modificato da un fattore geometrico, assume quindi il significato di parametro di riferimento per la previsione di vita a fatica. Questo approccio ha mostrato di essere molto affidabili nei casi di rinforzi longitudinali e in presenza di incisioni marginali.

#### *Fattori influenzanti la resistenza a fatica di giunzioni saldate*

Il campo tensionale e deformativo in prossimità del cordone di saldatura è generalmente ritenuto il responsabile del comportamento a fatica del giunto saldato e si è quindi cercato di valutarlo con la maggiore accuratezza possibile [20-21]. Gli strumenti a disposizione sono di tipo numerico o sperimentale, ma ognuno di questi ha delle limitazioni che portano ad approssimazioni anche rilevanti.

I modelli numerici ad esempio devono far riferimento a geometrie ideali e non possono tenere in conto in maniera appropriata della variabilità imputabile alle distorsioni e ai disallineamenti. La geometria locale del cordone è basata su valori medi statistici di misure sperimentali, la cui variabilità è influenzata in maniera spesso non controllabile dal processo di saldatura, dalla forma geometrica e dall'operatore. Di conseguenza, il risultato numerico è formalmente corretto, ma spesso volte si corre il rischio di riferirsi ad una geometria idealizzata troppo lontana dalla realtà. Per contro, le simulazioni numeriche rappresentano un potente strumento di calcolo, il cui uso è relativamente facile, veloce e affidabile. Inoltre, il risultato ottenuto consiste nell'intero campo tensionale e fornisce in prima approssimazione la sollecitazione locale di riferimento per i calcoli di verifica successivi.

L'altro strumento a disposizione, quello delle misure sperimentali, ha la forte limitazione di essere spesso ristretto ad aree di indagine limitate o addirittura puntuali. Solo i metodi ottici potrebbero fornire una descrizione completa dello stato tensionale e deformativo sulla superficie, ma la rugosità e le irregolarità superficiali generalmente presenti rappresentano un ostacolo quasi insormontabile. Un'altra possibilità è quella di usare estensimetri elettrici per la misura di deformazioni in punti ritenuti significativi e critici. In tal caso il numero di punti di misura è limitato ed in ogni caso la misura non è strettamente puntuale, ma estesa su un'area limitata ma comunque finita e corrispondente alle dimensioni della griglia estensimetrica usata. Pertanto le misure sono sempre affette da sorgenti di errore ineliminabili come quelle dovute agli alti gradienti di tensione e ad eventuali fenomeni di plasticizzazione locale. Nonostante questi inconvenienti, le misure sperimentali sono in grado di cogliere al meglio gli effetti della geometria globale e locale del giunto, compreso l'effetto dello spessore della piastra principale del giunto e della presenza di disallineamenti [22].

## **IL METODO DELLA DEFORMAZIONE LOCALE**

I metodi basati sulla misura di deformazione locale scelgono come parametro utile ai fini della valutazione della resistenza a fatica la deformazione locale; in particolare, l'ampiezza di deformazione  $\epsilon_a$ , misurata da estensimetri in prossimità del piede del cordone sotto carico statico, è considerata il dato più significativo per le verifiche a fatica.

La cosiddetta deformazione locale è quindi il risultato di un processo di integrazione su un'area finita corrispondente all'estensione della griglia estensimetrica. Di conseguenza, questo parametro può essere significativo per confrontare stati di tensione locali solo se viene standardizzata l'estensione e il posizionamento della griglia stessa rispetto al cordone. In altre parole, per ottenere un parametro ripetitivo, la dimensione della griglia estensimetrica e il suo posizionamento deve essere ben definito. Sulla base di esperienze passate [23-24] e della personale esperienza degli autori [25-26], il miglior compromesso tra la necessità di misurare quanto più vicino possibile al piede del cordone e l'affidabilità della misura stessa è rappresentata da estensimetri elettrici aventi una lunghezza di griglia di 3 mm e posizionati con il loro asse trasversale a 2.5 mm dal piede del cordone. In altre parole la misura estensimetrica sarà il risultato dell'integrazione del campo deformativo esistente nella zona tra 1 e 4 mm a partire dal piede del cordone. La Fig. 1 riporta alcuni esempi di installazioni estensimetriche eseguite per la validazione del metodo.

Poiché la rottura a fatica si innesca in maniera casuale in un punto posizionato lungo il piede del cordone, dove presumibilmente il raggio di raccordo assume un valore critico, se ne deduce come l'uso di un valore medio o di un valore fittizio di tale parametro nei modelli numerici possa essere considerata una forzatura. Una misura diretta delle deformazioni può fornire una valutazione più affidabile dell'effetto della geometria locale: la misura è infatti sicuramente capace di cogliere gli effetti di disallineamento e, per la sua vicinanza al cordone, risentire almeno in parte degli effetti locali indotti dal raggio di raccordo o dalla presenza di sotto-intagli. Infatti, nei giunti testati a fatica la rottura si manifesta quasi sempre dal lato del cordone in cui si rilevano le maggiori deformazioni.

La presenza invece di plasticizzazione locale all'apice ha anche una certa influenza, soprattutto nel caso di giunti molto spessi; anche in questo caso, nonostante l'estensione della zona plastica sia molto contenuta nell'arco di 1-2 mm dal piede del cordone, l'estensimetro posto immediatamente accanto riesca a coglierne in parte l'effetto; ciò è dimostrato



sperimentalmente dal fatto che durante l'applicazione sui giunti di carichi elevati si rilevano deformazioni sugli estensimetri che variano in modo non lineare con l'aumentare del carico.



Figura 1: Alcuni esempi dei giunti saldati in acciaio utilizzati per i test di fatica.

L'ampiezza di deformazione  $\epsilon_a$  deve essere misurata sottoponendo il giunto al ciclo presunto di carico a fatica e può essere messa in relazione al numero di cicli a rottura  $N$  in maniera da ottenere curve di resistenza a fatica in termini di ampiezze di deformazione locale, che risultano essere indipendenti dalla tipologia di giunto e dalla modalità di carico.

Da queste curve, ricavate per giunti di diversa geometria e sottoposti a cicli di carico caratterizzati da diversi valori del rapporto di sollecitazione  $R$ , è possibile estrapolare il valore  $\epsilon_A$  della deformazione locale in corrispondenza di  $N = 2 \cdot 10^6$  cicli.

La sperimentazione condotta su un gran numero di giunti saldati in acciaio strutturale, differenti per tipologia, spessore e modalità di carico, ha permesso di stabilire che il parametro ampiezza di deformazione locale è abbastanza insensibile alla variabilità di molti dei fattori che incidono sulla resistenza a fatica, rappresentandone una sorta di indicatore riassuntivo di tutto quanto accade al piede del cordone e che riveste una certa importanza ai fini della resistenza a fatica. Nei primi lavori [22, 25-29], relativi a giunti saldati con spessore delle piastre superiore a 10 mm, tutti i dati sono stati raggruppati con successo su un'unica curva di resistenza a fatica espressa in termini di ampiezza di deformazione locale. Successivamente, le prove condotte su giunti di spessore inferiore ai 10 mm [30-32] hanno evidenziato che questi manifestano una resistenza maggiore se espressa in termini di ampiezza di deformazione locale. Il diverso livello di tensioni residue che caratterizza le due classi di spessore dei giunti saldati considerati è stato proposto per spiegare questo comportamento [33-34].

In [35] si è voluto valutare l'applicabilità e la coerenza dei dati misurati anche in condizioni estremamente diverse; in tutti i giunti saldati che erano stati studiati fino ad allora l'asse del cordone di saldatura era perpendicolare alla forza applicata. In tale studio si sono invece considerati dei giunti saldati testa a testa aventi il cordone inclinato rispetto all'asse di trazione, incollando questa volta delle rosette al piede del cordone. In questa particolare condizione si ha il dubbio se considerare come ampiezza di deformazione locale quella principale, la cui direzione potrebbe essere incognita a priori, o quella normale al cordone. I dati sperimentali si sono accordati ottimamente a quelli degli altri giunti testati in precedenza, indicando che si può in ogni caso far riferimento alla deformazione misurata in direzione normale al cordone.

Lo stesso metodo è stato usato anche nel caso di sollecitazioni ad ampiezza variabile considerando un caso industriale reale [36]. In [37] infine è fornita una estesa discussione sulle peculiarità del metodo e sulle linee guida per la sua pratica applicazione.

La maggior parte della sperimentazione è stata condotta su giunti saldati in acciaio, ma l'applicabilità del metodo non viene meno cambiando materiale o processo di saldatura. In tal caso ovviamente i valori numerici delle ampiezze di deformazione che determinano una prefissata vita a fatica cambiano ed è quindi necessaria una sperimentazione su ogni materiale si voglia considerare. Alcune campagne sperimentali sono state condotte su giunti in lega di alluminio [38-39] e più recentemente gli autori e il gruppo di ricerca del Politecnico di Bari [40] stanno conducendo un'ampia campagna di prove sperimentali su giunti in lega di Titanio.



In generale, tutta la sperimentazione eseguita e l'esperienza acquisita nel corso degli anni permettono di affermare che l'uso dell'ampiezza di deformazione locale  $\epsilon_a$  come parametro di verifica della resistenza a fatica di giunzione saldate ha mostrato di essere estremamente affidabile come metodo di verifica di giunzioni saldate critiche.

*Correlazione tra geometria globale del giunto e ampiezza di deformazione locale*

Utilizzando la gran mole di dati sperimentali sui giunti saldati in acciaio analizzati in passato a fatica per la validazione del metodo, è possibile avere una base statistica per stabilire qual è l'effetto della geometria globale del giunto sull'ampiezza di deformazione locale. Nella Tab. 1 riportata di seguito si presentano, limitatamente ai giunti saldati in acciaio strutturale, tutte le prove di fatica eseguite nel corso degli anni per validare il metodo, evidenziando il numero di test a fatica realizzati, lo spessore delle piastre, la modalità di carico e la geometria. Per i dettagli delle prove si rimanda alle specifiche pubblicazioni.

Tali dati sono stati utilizzati per ricavare le curve riportate in Fig. 2a e 2b, relativamente al solo rapporto di sollecitazione  $R=0.1$ , ottenute a seguito dell'applicazione del Metodo della Deformazione Locale, distinguendo però due classi di spessore principali: giunti di piccolo spessore, fino ad 8 mm, e giunti di spessore medio, tra 10 e 25 mm. E' interessante notare sui diagrammi di fatica ottenuti l'estrema coerenza dei dati e la loro distribuzione particolarmente contenuta in uno spettro di deformazione basso a numero di cicli fissato. Ancora più importante è il fatto che sulla stessa curva di regressione vengono posizionati i dati riferiti a giunti molto diversi tra loro, sia per la loro forma (a croce, a T e di testa) che per gli spessori utilizzati e la modalità di carico principale (trazione o flessione). In entrambi i diagrammi infatti, si riscontrano ottimi valori del coefficiente R di correlazione ( $R^2= 0.89 - 0.69$ ) dei dati. Utilizzando tali curve è possibile stimare l'ampiezza di deformazione limite corrispondente alla vita convenzionale di  $2 \cdot 10^6$  cicli, pari rispettivamente a  $\epsilon_A = 356 \mu\epsilon$  per i giunti oltre 10 mm e  $\epsilon_A = 450 \mu\epsilon$  per i giunti fino a 8 mm.

Tipologia di Giunto	Modalità di Carico	Materiale	Spessore	Rapporto di sollecitazione	N° di provini	
	trazione	Fe510	3	-1	5	
			3	0.5	7	
			5	0.1	7	
			5	0.5	6	
			10	-1	5	
	trazione	Fe510	3	-1	6	
			3	0.1	11	
			3	0.5	7	
			5	-1	7	
			5	0.1	12	
			Fe430	17	0.1	12
			Fe510	25	-1	7
			Fe510	25	-0.25	6
	flessione 3p	E36	8	0.1	7	
		E560D	8	0.1	8	
		E36	20	0.1	6	
	trazione	Fe510	5	-1	5	
			15	-1	6	
			15	0.5	5	
	trazione incl. cord. 30°	Fe430	5	0.1	5	

Tabella 1: Riassunto complessivo delle prove di fatica eseguite su giunti in acciaio strutturale



E' necessario sottolineare che i dati sperimentali in termini di ampiezza di tensione  $\sigma_a$  sulle prove di fatica effettuate si dispongono in modo molto diverso se si riferiscono a giunti geometricamente differenti e soprattutto manifestano la classica dispersione molto elevata delle curve di Wöhler. Ciò obbliga il progettista a dover eseguire un numero di test molto superiore per determinare il limite di fatica della giunzione studiata e nel contempo ad applicare elevati coefficienti di sicurezza per tenere conto dell'elevata variabilità della durata prevista a fatica, calcolabile in seguito ad un regime tensionale imposto. A titolo di esempio infatti si presentano in Fig. 3 i dati, espressi questa volta in termini di ampiezza di tensione, relativi agli stessi giunti in acciaio riportati in Fig. 2-b. Si nota immediatamente l'elevata dispersione dei dati, soprattutto se riferiti a giunti di tipo diverso. Nello stesso diagramma viene anche indicata la curva di riferimento secondo normativa Eurocode, disposta ben al disotto delle curve sperimentali, proprio a causa dell'incertezza riscontrata.

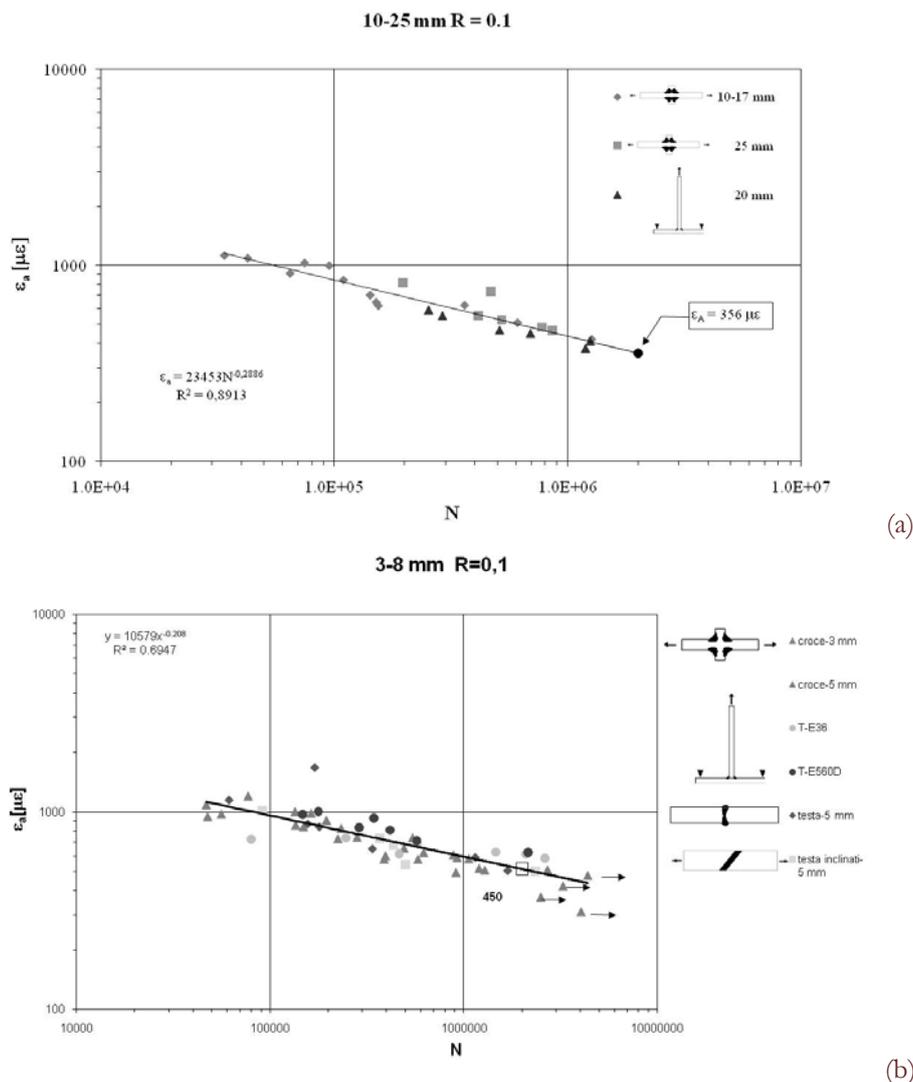


Figura 2: Curve di resistenza a fatica in termini di ampiezza di deformazione locale di giunti saldati in acciaio: a) spessori 10-25 mm; b) spessori 3-8 mm

Una limitazione del metodo è invece imputabile proprio al suo approccio sperimentale: una verifica del cordone di saldatura può essere effettuata solo se il componente è stato realizzato, strumentato opportunamente con estensimetri e quindi caricato. Questo significa che in fase di progettazione il metodo non potrebbe fornire indicazioni utili al dimensionamento del giunto. Per superare questo inconveniente si può stabilire statisticamente, almeno per quelle tipologie di giunto che sono state effettivamente studiate, quanto l'ampiezza di deformazione locale, misurata secondo i dettami del metodo, si discosti da quella nominale che è facilmente calcolabile in modo analitico. In pratica si può definire un coefficiente di amplificazione locale della deformazione  $K_{\epsilon_a}$  in questa maniera:



$$k_{\epsilon a} = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_{a,nom}} \tag{1}$$

dove  $\epsilon_a$  è l'ampiezza locale di deformazione misurata, mentre  $\epsilon_{a,nom}$  è l'ampiezza nominale di deformazione applicata al giunto, che nel caso di una sollecitazione monoassiale di trazione è immediatamente nota dalla relazione seguente:

$$\epsilon_{\epsilon,nom} = \frac{\sigma_a}{E} \tag{2}$$

in cui  $\sigma_a$  è l'ampiezza nominale di carico.

I valori medi di questo fattore relativi ai test eseguiti su alcune tipologie di giunti, di cui è riportata anche la numerosità del campione, sono riportati in Tab. 2. I dati sono stati calcolati anche nel caso di carico prevalente di flessione e sono classificati non solo in base alla tipologia di giunto ma anche in base allo spessore della piastra principale.

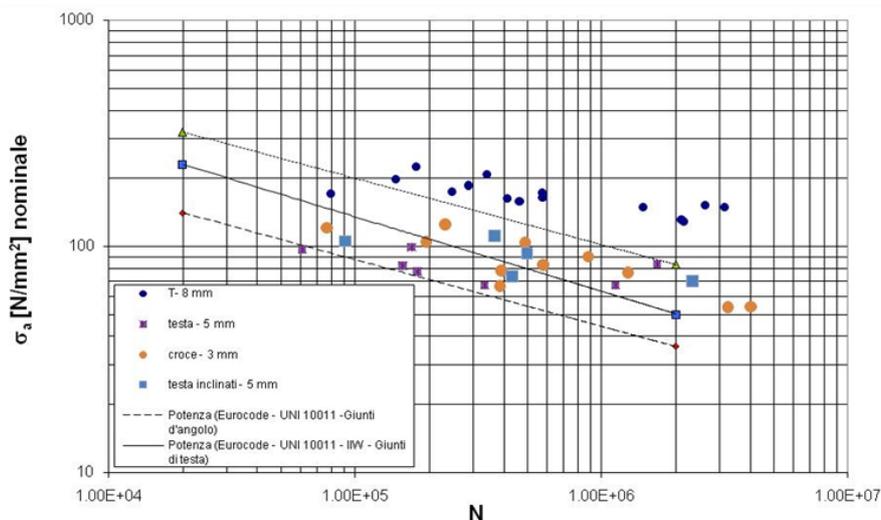


Figura 3: Curve di resistenza a fatica in termini di ampiezza di tensione per giunti saldati in acciaio di vario tipo e normativa di riferimento.

tipo di giunto spessore	numero di provini	$k_{\epsilon a} = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_{a,nom}}$	
		valore medio	deviazione standard
giunti a croce 3-5 mm	42	1.740	0.405
giunti a croce 10-25 mm	37	1.312	0.188
giunti testa a testa 3-5 mm	18	2.201	0.497
giunti testa a testa thickness 8 mm	12	1.297	0.156
giunti a T 8 mm	15	0.909	0.070
giunti a T 20 mm	6	1.001	0.039
giunti ad angolo 5 mm	5	0.579	0.010
giunti ad angolo 20 mm	10	0.712	0.080

Tabella 2: Valore caratteristici del coefficiente di amplificazione locale della deformazione.



Non per tutte le categorie di giunto si ha una numerosità del campione sufficiente; nonostante questo, si possono dedurre alcune interessanti considerazioni. Si può osservare innanzitutto una differenza fra i giunti a seconda se il tipo di sollecitazione prevalente sia la flessione o la trazione. Nel caso dei giunti a T per esempio, dove l'unica sollecitazione che interessa il cordone è la flessione, la deformazione locale coincide praticamente con quella nominale: per tali giunti le flessioni spurie dovute ai disallineamenti sono assenti per via del tipo di carico applicato. Nei giunti ad angolo invece, in cui il cordone è sollecitato da una trazione eccentrica, la deformazione locale è sensibilmente inferiore all'unità, evidenziando la particolare criticità in termini di resistenza a fatica di quel particolare dettaglio strutturale.

Un'altra importante osservazione riguarda lo spessore della piastra principale che costituisce il giunto: sia nei giunti testa a testa che in quelli a croce gli spessori minori hanno valori di deformazione locale molto più pronunciati rispetto a quelli nominali, facilmente spiegato con i maggiori disallineamenti, e si riscontra anche maggiore variabilità del parametro  $K_{\epsilon_a}$ , da cui sono affetti questi giunti.

Tale parametro può essere classificato in modo univoco in base alla tipologia di giunto considerato, dal momento che tiene conto anche dello spessore delle piastre e della scala geometrica del dettaglio strutturale, diventando così un coefficiente utile al progettista per stimare sulla base di calcoli analitici o FEM (in relazione alla complessità della giunzione) la deformazione locale prevista  $\epsilon_a$  in seguito ai carichi di progetto, calcolando sulle curve in Fig. 2a e 2b la prevista vita residua a fatica.

#### *L'influenza della geometria locale sulle misure di deformazione locale*

La misura di deformazione locale è molto sensibile agli effetti del disallineamento, se è vero che si riduce nel caso di sollecitazioni di flessione. In aggiunta, tale misura riesce a cogliere in parte anche gli effetti della geometria locale del cordone, generalmente associabili con buona approssimazione al valore del raggio di raccordo al piede del cordone. Data la loro importanza, questi fattori geometrici sono stati misurati per alcune tipologie di giunti e se ne riportano di seguito i risultati. È noto infatti che valori diversi del raccordo  $r$  rispetto al modello numerico del giunto alterano sensibilmente le tensioni all'apice dell'intaglio del cordone, mentre valori anche piccoli di disallineamento angolare determinano sovrasollecitazioni spurie che producono talvolta incrementi tensionali superiori ai 100 MPa.

Il raggio di raccordo è stato misurato in diverse sezioni di 8 giunti testa a testa e 8 giunti a croce con spessore variabile di 5-10 mm ed in alcuni giunti in lega di Titanio saldati al laser. È stato realizzato un calco del cordone con una resina polimerica siliconica, successivamente sezionato in strati sottili con spessore medio di 1 mm in modo da avere una buona indicazione della variabilità del raggio di raccordo lungo il cordone.

Tutti i dati relativi al raggio di raccordo sono stati riassunti nelle curve riportate in Fig. 4a per i giunti in acciaio e in Figura 4b per i giunti in titanio. La variabilità del raggio di raccordo è comunque molto elevata e fortemente dipendente dalla modalità di esecuzione della saldatura; i dati sono ben descritti da una distribuzione normale, seppure con una deviazione standard piuttosto elevata. Relativamente ai giunti saldati in acciaio, si è determinato un valore medio di 2.47 mm per i giunti testa a testa e 0.79 mm per i giunti a croce; tali dati sono in accordo con quanto comunemente affermato in letteratura [8-9]. Il risultato più evidente è che per giunti in acciaio in genere si prevede un valore del raggio che può con buona probabilità valere da 0.5 fino 4 mm, determinando forti incertezze sui risultati dei calcoli FEM o altri metodi analitici. Per i giunti testa a testa saldati al laser in lega di titanio si è determinato invece un valore medio del raggio di raccordo pari a 0.98 mm.

Per quanto riguarda il disallineamento di giunti saldati di testa ed a croce, sono state effettuate circa 80 misure dell'angolo  $\alpha$  di disallineamento tra le piastre principali su giunti di vario tipo e di spessore di 5, 10 e 25 mm, successivamente sottoposti a prove di fatica in trazione. In Fig. 5 si riassume la distribuzione dei dati provenienti dalle misure di  $\alpha$ ; i dati presentano una distribuzione asimmetrica, affatto rappresentabile dai valori di media e deviazione standard di una distribuzione normale. In particolare l'angolo assume nella maggior parte dei casi un valore diverso da zero, ma abbastanza contenuto nell'ordine di un grado decimale (la media risulta infatti di circa 1,096°); in altri casi molto meno frequenti si riscontrano angoli molto elevati fino ai 5° per alcuni provini, giudicati eccessivamente poco significativi data la frequenza molto bassa e tenendo conto che la lavorazione manuale dei provini può aver prodotto delle distorsioni non dovute al processo.

In Fig. 6 si è riportato su un medesimo grafico l'ampiezza di deformazione  $\epsilon_a$ , misurata per le prove di fatica, in funzione dell'angolo di disallineamento  $\alpha$ . Naturalmente sono stati considerati solo giunti sottoposti ad un carico di trazione a fatica molto simile, in un intervallo ristretto di tensioni nominali applicate; si noti la mancanza di alcuna correlazione precisa, evidenziando forti variazioni delle deformazioni misurate dagli estensimetri. Ciò è una conferma, seppur indiretta, del fatto che la deformazione  $\epsilon_a$  non venga influenzata unicamente dal disallineamento ma anche da effetti locali del cordone o



comunque caratteristici del giunto esaminato, confermandone la validità come parametro rappresentativo ai fini della valutazione della resistenza a fatica.

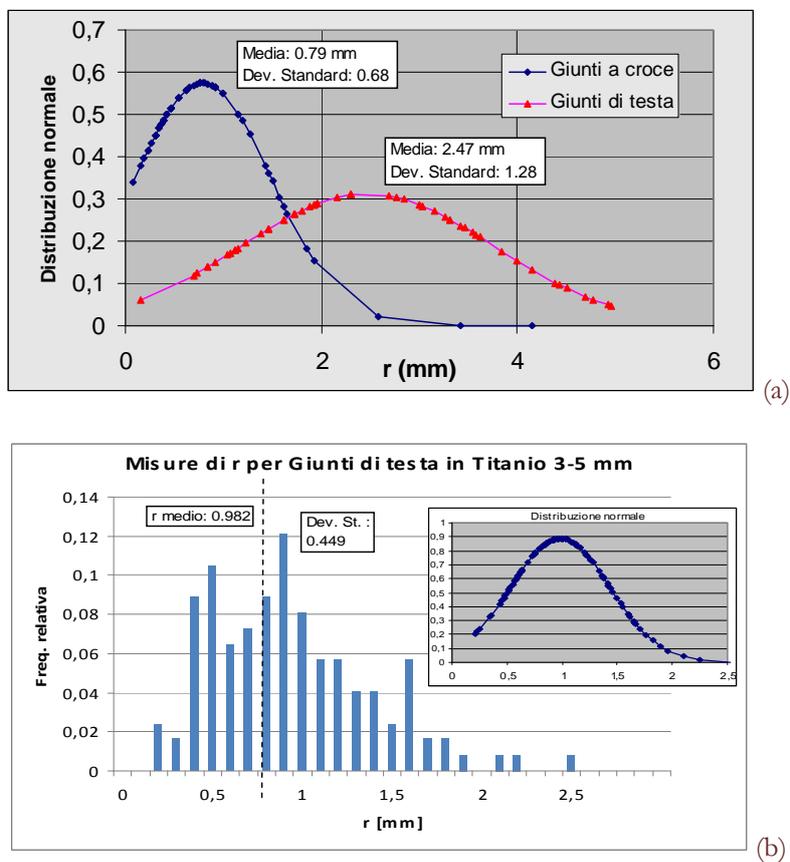


Figura 4: Distribuzione del raggio di raccordo: a) giunti in acciaio; b) giunti in titanio.

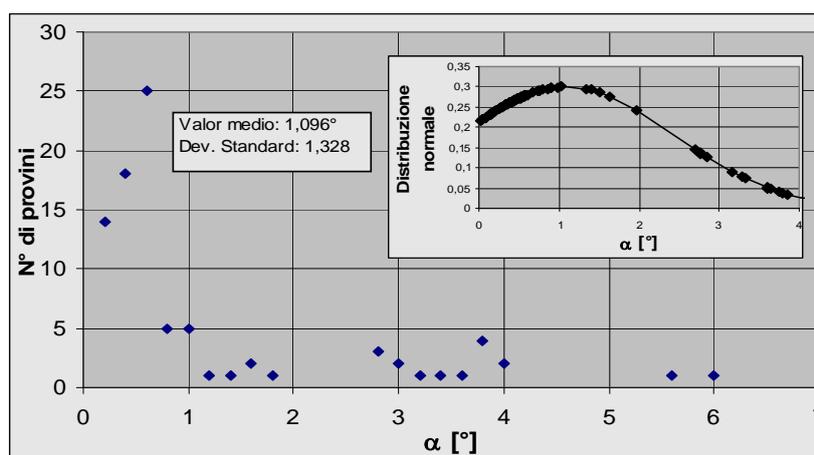


Figura 5: Distribuzione dei valori misurati dell'angolo di disallineamento  $\alpha$ .





## CONCLUSIONI

Il lavoro eseguito consente di stabilire in modo preciso l'affidabilità e l'efficacia del metodo della deformazione locale per la verifica a fatica dei giunti saldati. Sono state ottenute infatti, le curve di riferimento per il calcolo della vita residua in termini di misura dell'ampiezza  $\epsilon_a$ , adoperando i risultati da prove di fatica eseguite su diverse tipologie di giunti, con variabile spessore delle piastre ed anche modalità di carico a trazione e flessione. Raggruppando tutti i dati disponibili in soli due classi di spessori, i risultati del metodo si dimostrano eccezionalmente coerenti ed offrono una curva di riferimento univoca per la progettazione a fatica in termini di deformazione, che ha carattere globale.

Gli esperimenti effettuati hanno consentito anche di determinare con certezza l'influenza dei parametri perturbanti sulla metodologia proposta per il dimensionamento a fatica, come ad esempio la variabilità della geometria del raccordo al cordone, la presenza del disallineamento fra le piastre e la geometria globale della classe strutturale del giunto.

Infine si è dimostrata l'applicabilità del metodo anche su materiale diverso, dal momento che si ottengono delle curve di progetto altrettanto valide, anche se posizionate in un campo differente di valori del numero di cicli.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Eurocode 3 – Design of steel structures, ENV1993-1-1. European Committee for Standardization (1992).
- [2] Fatigue design and assessment of steel structures, BS7608, British Standard Institution, London (1993).
- [3] Structural welding code – steel, ANSI/AWS D1.1-86, American Welding Society (1986).
- [4] D. Radaj, *Int. J. of Fatigue*, 18(3) (1996) 1530.
- [5] J. L. Fayard, A. Bignonet, K. Dang Van, International conference on fatigue welded components and structures, VII International spring meeting.
- [6] T. Partenen, E. Niemi, *Fatigue Fract. Engineer. Material Structure*, 19(6) (1996) 709.
- [7] K. Iida, Annual meeting of International Institute of Welding, XIII (1983) 1103.
- [8] D. Radaj, Design and analysis of fatigue resistant welded structures, Abington Publishing, Cambridge (1990).
- [9] D. Radaj, C.M. Sonsino, Fatigue assessment of welded joints by local approaches, Abington Publishers, Cambridge (1998).
- [10] International Institute of Welding (IIW), ISO Standard Proposal, IIW document XIII-1539-96 / XV-845-96 (1996).
- [11] G. Qylafku, Z. Azari, N. Kadi, M. Gjonaj, G. Pluvillage, *Int. J. of Fatigue*, 21 (1999) 753.
- [12] D. Taylor, P. Bologna, K. Bel Knani, *Int. J. of Fatigue*, 22 (2000) 735.
- [13] M.L. Williams, *J. of Applied Mechanics*, 74 (1952) 526.
- [14] Y. Verreman, B. Nie, *Fatigue, Fracture & Engineering Material Structures*, (1996) 19.
- [15] P. Lazzarin, R. Tovo, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 21 (1998).
- [16] P. Lazzarin, P. Livieri, *Int. J. Fatigue*, 23 (2001).
- [17] B. Atzori, P. Lazzarin, R. Tovo, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 22 (1999).
- [18] J. Maddox, Advances in fatigue science and technology, CEMUL, Alvor Beach Algarve, 4-15 April 1988 (1998).
- [19] J.M. Ferreira, A.H. Pereira, C.M. Branco, *Thin-Walled Structures*, 21 (1995) 107.
- [20] K. Masubuchi, Analysis of welded structures, Pergamon Press, USA.
- [21] T.R. Gurney, Fatigue of welded structures, Cambridge University Press (1979).
- [22] C. Pappalettere, R. Nobile, Notch Effects in Fatigue and Fracture (G. Pluvillage and M. Gjonanj editors) NATO Sciences Series II – Mathematics, Physics and Chemistry, Kluwer (2000).
- [23] Haibach, Proc. of the Conference on Fatigue on Welded Structures, The Welding Institute, Abington (UK), 2 (1971).
- [24] B. Atzori, G. Blasi, C. Pappalettere, *Experimental Mechanics*, 25 (1985) 2
- [25] V. Dattoma, G. Demelio, C. Pappalettere, Proceedings of XXII Convegno AIAS, Forlì (1993).
- [26] V. Dattoma, C. Pappalettere, *J. of Strain Analysis*, 36 (2001) 6.
- [27] V. Dattoma, F.W. Panella, C. Pappalettere, Proceedings of XXIX Convegno AIAS, Lucca (2000).
- [28] R. Nobile, C. Pappalettere, Proceedings of XV Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura (IGF), Bari (2000).
- [29] R. Nobile, Verifica ed affidabilità delle strutture saldate, Tesi di dottorato, Politecnico di Bari-Université de Metz (2001).
- [30] C. Casavola, R. Nobile, C. Pappalettere, Proceedings of XXX Convegno AIAS, Alghero (2001).
- [31] C. Casavola, R. Nobile, C. Pappalettere, New Trends in Fatigue and Fracture, Metz (2002).
- [32] C. Casavola, R. Nobile, C. Pappalettere, New Trends in Fatigue and Fracture II, Hammamet, (2003).



- [33] C. Casavola, R. Nobile, C. Pappalettere, Society of Experimental Mechanics (SEM) Annual Conference, Charlotte North Carolina (USA) (2003).
- [34] C. Casavola, R. Nobile, C. Pappalettere, SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Costa Mesa (USA), (2004).
- [35] V. Dattoma, R. Nobile, F.W. Panella, XXXII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS) – Salerno (2003).
- [36] C. Casavola, U. Galietti, M. Gismondi, F. Pierattini, XXXII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS) – Salerno (2003).
- [37] C. Casavola, C. Pappalettere, *Int. J. of Fatigue*, 31 (2009).
- [38] C. Casavola, C. Pappalettere, Proceedings of SEM annual conference and exposition on experimental and applied mechanics, Portland (USA), (2005).
- [39] C. Casavola, C. Pappalettere, Proceedings of the International Conference New Trends in Fatigue and Fracture 5, Bari (Italy), (2005).
- [40] C. Casavola, F. Tattoli, C. Pappalettere, Proceedings of SEM annual conference and exposition on experimental and applied mechanics, Springfield (USA) (2007).