



Assessment of burr grinding influence on fatigue strength of steel welded joints

Metodologie di previsione dell'influenza della molatura sulla resistenza a fatica di giunzioni saldate in acciaio

P. Livieri

Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, via Saragat 1, 44100, Ferrara

R. Tovo

Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, via Saragat 1, 44100, Ferrara

ABSTRACT. The paper deals with the effect of the weld bead geometry on the fatigue strength of a joint, mainly focusing on geometry change due to post-welding grinding. Weld toe burr grinding has usually a positive effect on fatigue strength; contrarily excessive material removal at weld throat can decrease its strength. These effects have been experimentally evaluated and compared with proper numerical estimations. By means of the numerical evaluations of the effective stress, obtained by the Implicit Gradient method, the estimation of the geometric component of the burr grinding process is possible. The procedure is able to analyze a real joint, geometrically modeled by a laser scanner acquisition, and it is possible to assess the excessive net section reduction, in a grinding operation.

SOMMARIO. La memoria tratta l'effetto della geometria del cordone sulla resistenza a fatica della giunzione, con riferimento alle variazioni di geometria dovute al trattamento meccanico post-saldatura di molatura. Si valuta sia l'effetto benefico della molatura per raccordare il piede del cordone, sia il potenziale difetto dell'eccesso di asportazione di sovrametallo. La resistenza a fatica sperimentale di giunzioni saldate in acciaio da costruzione molate dopo saldatura è confrontata con opportune analisi numeriche. Utilizzando la valutazione numerica della tensione efficace ottenibile con il metodo del gradiente implicito è possibile stimare la componente geometrica dell'intervento post-saldatura. Sono stati analizzati casi reali acquisiti con laser scanner, in cui si è valutato quando, in un operazione di molatura, l'eccessivo intervento diviene controproducente.

KEYWORDS. Welded joint; Fatigue; Post welding treatment; Gradient.

INTRODUZIONE

L'analisi numerica dell'effetto della geometria del cordone di saldatura sul comportamento meccanico è uno dei vari settori in cui è importante la possibilità di calcolare gli effetti locali di concentrazione di tensione e il loro rapporto con la resistenza strutturale. In questo settore il metodo del gradiente implicito è risultato uno strumento molto efficace che ha trovato un ampio campo di applicazioni nell'ambito delle saldature ad arco o per punti [1, 2]. Ciò è possibile perché, pur schematizzando i cordoni come elementi prismatici a spigolo vivo in materiale a comportamento lineare elastico, il metodo è capace di calcolare un valore della tensione efficace σ_{eff} in tutti i punti del cordone di saldatura,



compresi gli piede e radice dove i valori lineari elastici delle tensioni tenderebbero all'infinito [3-5]. In questo modo si riescono ad affrontare problemi complessi di previsione della vita a fatica senza apportare variazioni geometriche al modello 3D come quelle proposte in [6-8]. Inoltre, i risultati numerici sono ottenuti senza incontrare particolari problemi di convergenza numerica nonostante la natura tridimensionale del problema tensionale.

La presente memoria prosegue l'attività presentata recentemente in [9], approfondendo la possibilità di usare il metodo numerico del gradiente implicito per valutare l'effetto della geometria del cordone di saldatura sulla resistenza a fatica. In particolare si concentra l'effetto geometrico della molatura post-saldatura. La memoria confronta le previsioni numeriche con le evidenze sperimentali su dati presi da letteratura, ma anche su alcuni dati sperimentali specificamente investigati.

IL METODO DEL GRADIENTE IMPLICITO

La definizione di una tensione equivalente ai fini della rottura per fatica, risale ai primi contributi di Neuber [10] per poi essere estesa in varie forme in successivi contributi [11-13]. La definizione di tipo generale della tensione non-locale fatta negli anni 80 da Pijaudier-Cabot [14] può essere ricondotta ad una tensione efficace [1,15-19] definita in tutto il volume. Considerato un corpo di volume V è possibile definire una tensione efficace equivalente non locale σ_{eff} nel punto generico x come media integrale di una tensione locale σ_{eq} (nel nostro caso la tensione principale) pesata con una opportuna funzione peso $\alpha(x,y)$ che tiene in considerazione la mutua distanza s dei vari punti del corpo ($s = \|x - y\|$):

$$\sigma_{\text{eff}}(x) = \frac{1}{V_r(x)} \int_V \alpha(x,y) \sigma_{\text{eq}}(y) dy \quad \text{in } V \quad (1)$$

Nell'Eq. (1), il simbolo $V_r(x)$ denota il volume di riferimento, mentre, per $\alpha(x,y)$ una scelta conveniente è rappresentata dalla funzione gaussiana.

La tensione efficace σ_{eff} può essere calcolata, anziché valutando punto per punto il valore medio della tensione principale con l'Eq. (1), risolvendo in via alternativa l'equazione differenziale equivalente di Helmholtz nel volume V del componente imponendo come condizioni al bordo le condizioni di Neumann ($\nabla \sigma_{\text{eff}} \cdot \mathbf{n} = 0$ su tutto il contorno ∂V) [15]:

$$\bar{\sigma}_{\text{eff}} - c^2 \nabla^2 \bar{\sigma}_{\text{eff}} = \sigma_{\text{eq}} \quad \text{in } V \quad (2)$$

dove c è un parametro intrinseco legato al materiale in esame e avente le dimensioni fisiche di una lunghezza, ∇^2 è l'operatore di Laplace e σ_{eq} è la tensione ritenuta responsabile del danneggiamento del materiale (in questo lavoro la σ_{eq} , ossia la tensione principale massima è valutata con gli elementi finiti nell'ipotesi di materiale a comportamento lineare elastico). Il parametro c è legato in modo univoco alla lunghezza intrinseca a_0 di El Haddad et al. [20]; nel caso di tensione efficace ottenuta dalla tensione principale massima il legame fra c ed a_0 è di tipo lineare: $c = 0.54 \cdot a_0$.

L'INCREMENTO DI RESISTENZA PER MOLATURA DEL PIEDE DEL CORDONE

La molatura del piede del cordone, assieme alla rasatura del cordone stesso, sono una delle operazioni meccaniche post saldatura utilizzabili per ottenere un incremento della resistenza a fatica della giunzione [21]. In termini di resistenza a fatica, la valutazione dell'effetto benefico dovuto ad una molatura può essere influenzato da diversi fattori, tra cui la modalità di esecuzione, l'entità e tipologia di intervento nonché le caratteristiche meccaniche e metallurgiche della giunzione di partenza. Tra questi parametri, uno dei possibili fattori è la configurazione e la variazione della geometria complessiva [22] di cui in Fig. 1 si riporta un esempio.

In generale l'incremento di resistenza ottenibile può essere limitato, in caso di trattamento non ottimizzato, o raggiungere valori anche del 40%. A titolo di esempio, in [23, 24] è fornita una sintesi di dati sperimentali tratti da letteratura e riportata in Fig. 2 così come proposta dall'autore. Tale analisi utilizza bande di dispersione unificate allo scopo di stimare possibili curve di resistenza a fatica di progetto utilizzabili per ciascuno dei trattamenti post saldatura analizzati.

La Fig. 2 riporta l'incremento di resistenza espresso come rapporto tra la classe di resistenza della giunzione trattata rispetto all'omologo riferimento del giunto "as welded". Quest'ultimo nell'analisi proposta è risultato pari a 96 MPa mentre un gruppo di giunzioni con processi ottimizzati, mostra una resistenza di 133 MPa, ossia superiore del 36%.

Per verificare quanto di questo effetto può essere previsto numericamente si sono considerati i profili di cordoni riportati in Fig. 1, applicati alle geometrie di giunzioni investigate in [23] e in [25] riportate in Fig. 3. Per le geometrie analizzate si è eseguita l'analisi lineare elastica e la valutazione della tensione efficace con la metodologia del gradiente implicito descritta. I risultati ottenuti sono riportati in Tab. 1 per entrambe le serie di geometrie.



Figura 1: Geometria e microstruttura in un giunto come saldato AW o lavorato al piede con mola BG [22].

Figure 1: Geometry and microstructure of a welded joint, as welded AW and burr grinding BG [22].

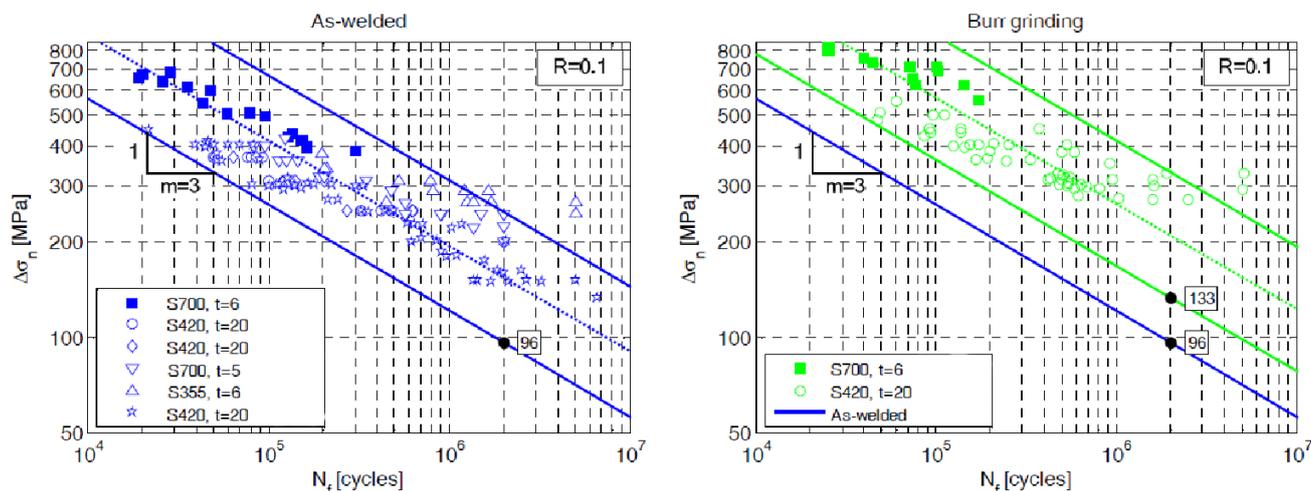


Figura 2: Dati sperimentali di resistenza a fatica di giunti as welded” e “burr grinding” [24].

Figure 2: Experimental fatigue strength of joints” as welded” e “burr grinding” [24].

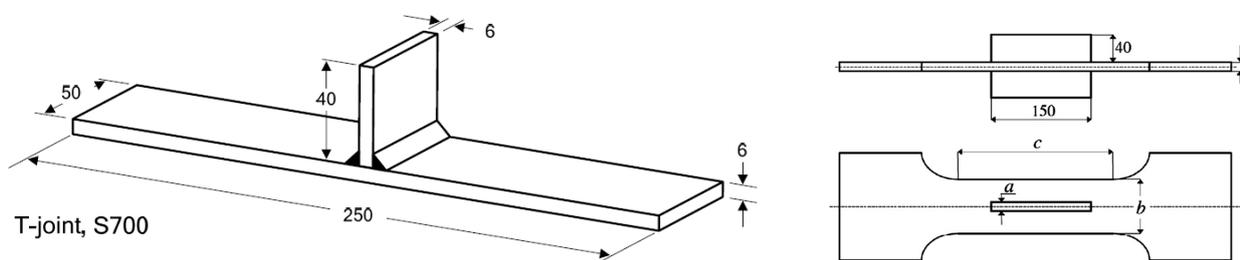


Figura 3: Geometrie analizzata numericamente: irrigidimento trasversale [23] e irrigidimento longitudinale [25]

Figure 3: Numerically investigated geometries: transversal stiffener [23] e longitudinal stiffener [25]

Si deve considerare che tale procedura numerica valuta esclusivamente la componente geometrica di riduzione della tensione efficace in prossimità del cordone di saldatura. Si ignorano altri benefici legati, ad esempio, alle variazioni dello



stato tensionale residuo o all'eliminazione di zone metallurgicamente difettose. I risultati ottenuti indicano che la lavorazione alla mola induce, nella configurazione geometrica considerata, una riduzione delle tensioni efficaci, indicativamente compresa tra il 13% e il 17%. Nella "molatura" la componente geometrica sembra comunque rilevante rispetto al complessivo decremento di resistenza, ma non tale da poter affermare che la componente geometrica giustifichi tutto l'incremento di resistenza;

Si conclude quindi che, ad una prima verifica, la metodologia del gradiente implicito possa essere in grado di apprezzare una componente rilevante del decremento di tensione efficace legato alla variazione morfologica del cordone di saldatura.

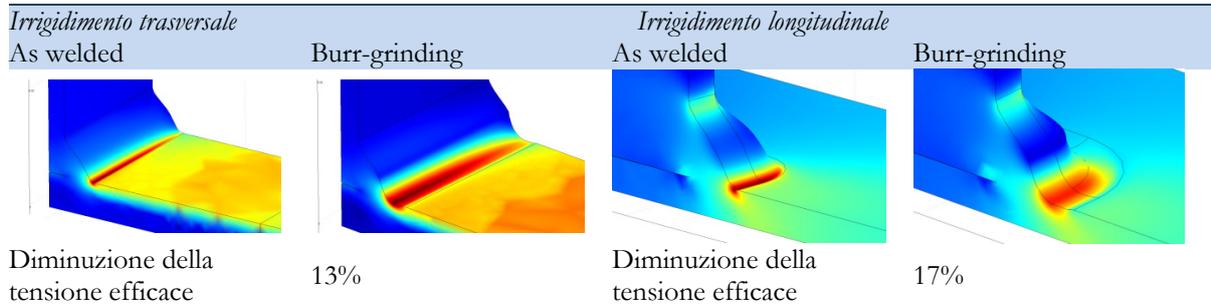


Tabella 1: Incremento di resistenza dovuto ad effetto geometrico stimato con gradiente implicito.

Table 1: Implicit gradient estimation of geometrical effect on strength improvement.

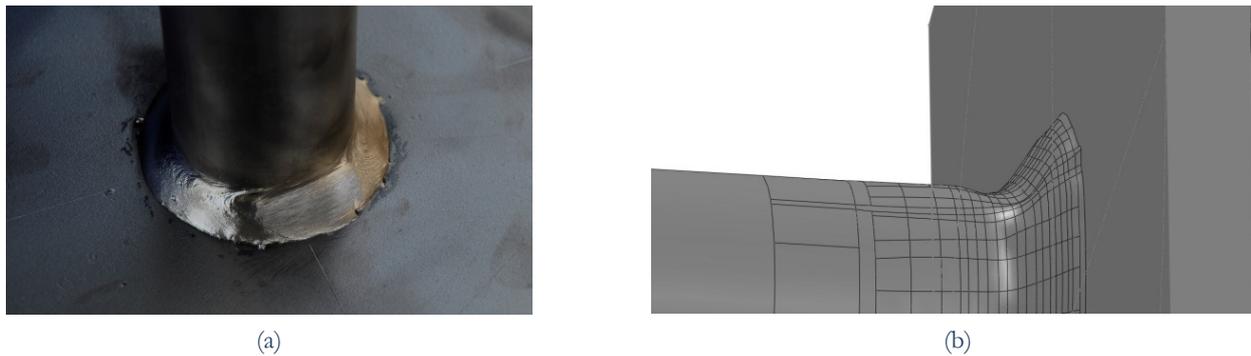


Figura 4: Giunzione saldata (piastra 10 mm di spessore, tubo 4 mm, diametro esterno 42.4); b) modello tridimensionale.

Figure 4: Welded joint (10 mm plate thickness, 4 mm tube, external diameter 42.4); b) 3D model.

STUDIO DI UN CORDONE DI SALDATURA INDEBOLITO ALLA MOLA

Si è utilizzato il metodo proposto per analizzare un cordone di saldatura indebolito da un colpo di mola necessario per eliminare il sovrametallo da chiusura del cordone in una saldatura circonferenziale "tubo su flangia". In questi casi è prassi comune terminare la giunzione con il ricoprimento della parte terminale del cordone, sopra il tratto iniziale. Il sovrametallo che si ottiene deve essere eliminato con una molatura; purtroppo, per eseguire una molatura raccordata si deve spesso incidere sulla geometria del cordone.

In giunto investigato è in acciaio S355, presenta una molatura sul sovrametallo terminale che va a diminuire la sezione resistente del cordone (un esempio è dato in Fig. 4). La molatura appare ben raccordata, in base alla UNI-EN-ISO 6520, il difetto è classificabile come una molatura eccessiva, con codice 606, e non come colpo di mola (604). Oltre la semplice classificazione prevista dalla norma, la normativa sul livello di accettabilità dei difetti: UNI-EN-ISO 5817 non fornisce nessuna prescrizione sui livelli di accettabilità di tale irregolarità.

Utilizzando uno scanner tridimensionale Romer modello 7320SI, avente una precisione di 6 centesimi di millimetro in scansione, è stata digitalizzata l'intera superficie esterna del cordone di saldatura del collegamento tubo-piastra riportato in Fig. 4. Il modello tridimensionale del giunto saldato è riportato in Fig. 4.b. La parte interna della giunzione, non essendo visibile dallo scanner, è stata ricostruita con il modellatore solido ipotizzando assenza di penetrazione del cordone di saldatura.

Sono stati analizzati due diversi provini, con molature con caratteristiche leggermente diverse. La Fig. 5, riporta la mesh del modello FEM e l'elaborazione del gradiente implicito per una sollecitazione flessionale. I giunti sono stati successivamente sollecitati a fatica con rapporto di ciclo nominale pari ad 0.05.

I provini, per l'intera vita a fatica, è stato monitorato con i liquidi penetranti. La Fig. 5, evidenzia che la zona di innesco del difetto per fatica è avvenuta esattamente nella zona in cui il gradiente implicito prevedeva una condizione di massimo. Si fa osservare che la frattura poteva anche avvenire al piede del cordone in prossimità del tubo o della piastra come sarebbe sicuramente successo nel caso di cordone integro [26].

La Fig. 6 mostra la previsione di resistenza a fatica, in termini di gradiente implicito, per le saldature modificata alla mola nonché il livello tensionale di un cordone non indebolito. La curva di resistenza di riferimento è quella generale per saldature in acciaio [18]. Nella stessa figura sono riportati le durate sperimentali del provino molato. Il primo punto si riferisce alla condizione di innesco mentre il secondo indica il punto in cui la cricca è diventata passante, condizione di fatto assimilabile alla rottura del giunto stesso.

La corrispondenza fra dati sperimentali e curva di riferimento conferma la capacità di previsione del gradiente implicito e che la specifica molatura eseguita comporta una riduzione di resistenza a fatica, anche se la differenza non è elevata e la diversità in stima di durata è inferiore alla dispersione naturale del fenomeno.

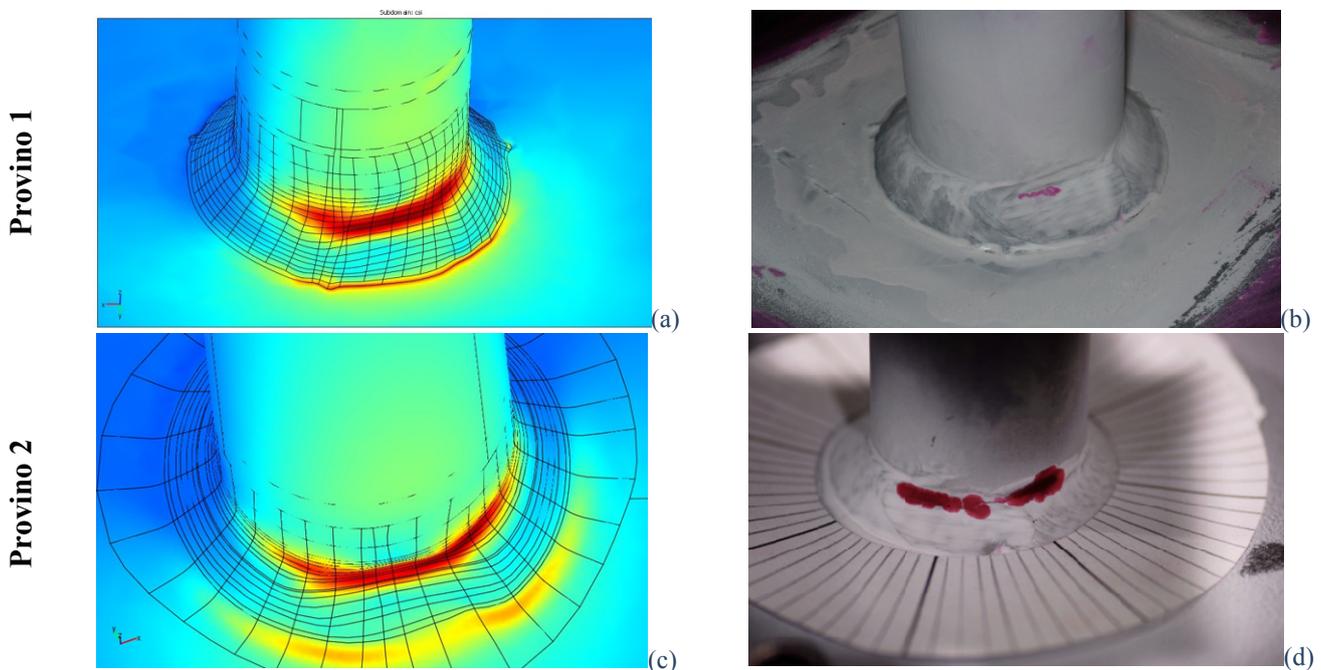


Figura 5: Soluzione con gradiente implicito e inneschi di cricca evidenziati dai liquidi penetranti.

Figure 5: Implicit gradient solution ad dye penetrant inspection of crack initiation.

CONCLUSIONI

Il metodo del gradiente implicito si è dimostrato un metodo numerico estremamente versatile e capace di prevedere la resistenza a fatica non solo dei cordoni schematizzabili come elementi prismatici ideali ma anche nel caso in cui il cordone sia rappresentato nella sua reale forma tridimensionale.

Il metodo, così come è applicabile a giunti saldati di grosse o piccole dimensioni (per esempio saldature per punti), è in grado di prevedere l'effetto geometrico nei cordoni delle saldature modificate al piede del cordone.

Grazie all'acquisizione ottenuta con uno scanner tridimensionale si è riusciti a studiare la resistenza a fatica ed il relativo punto di innesco di un cordone di saldatura indebolito da una operazione manuale di molatura. Oltre alla previsione del punto di rottura, anche la previsione di durata ottenuta è risultata apprezzabile.

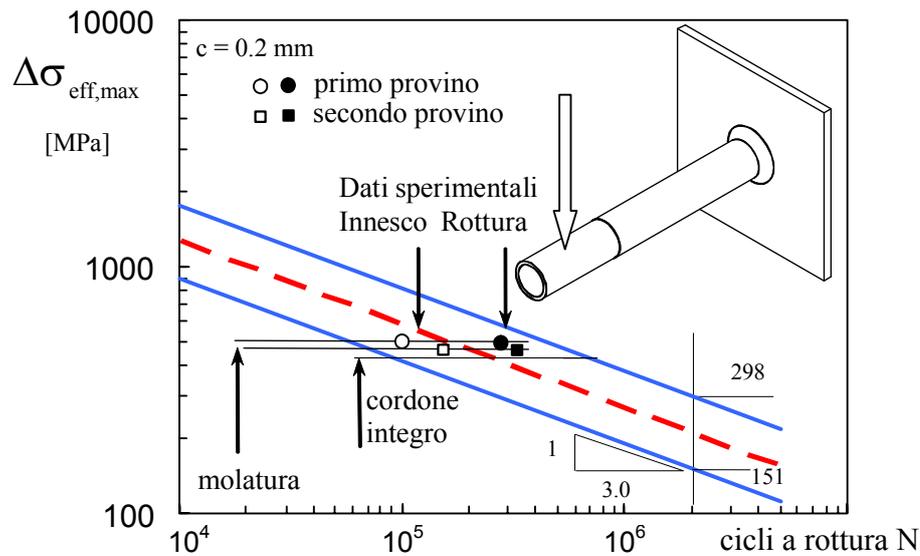


Figura 6: Confronto fra dati sperimentali e previsione numerica.

Figure 6: Comparison of experimental data and numerical assessment.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Tovo, P. Livieri, *Engineering Fracture Mechanics*, 74 (2007) 515.
- [2] R. Tovo, P. Livieri, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 34 (1) (2011) 32.
- [3] M.L. Williams, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 19 (1952) 526.
- [4] P. Lazzarin, R. Tovo, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 21 (1998) 1089.
- [5] P. Livieri, P. Lazzarin, *International Journal of Fracture*, 133 (2005) 247.
- [6] A. Hobbacher. Recommendation on fatigue of welded components, IIW Doc. XIII-1539-95/ XV-845-95 (1995).
- [7] British Standard Published Document, Code of practice for fatigue design and assessment, BS 7608, (1993).
- [8] D. Radaj, C.M. Sonsino, W. Fricke. *Fatigue assessment of welded joints by local approaches.*, CRC Press, (2006).
- [9] P. Livieri, R. Tovo, S. Bettinelli, In: 40° Convegno Nazionale AIAS, Palermo (2011).
- [10] H. Neuber, *Konstruktion*, 20 (1968) 245.
- [11] P. Lazzarin, R. Tovo, G. Meneghetti, *International Journal of Fatigue*, 19 (1997) 647.
- [12] D. Taylor, *Int. Journal of Fatigue*, 21 (1999) 413.
- [13] P. Livieri, R. Tovo, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 27 (2004) 1037.
- [14] G. Pijaudier-Cabot, Z.P. Bazzant, *Journal of Engineering Mechanics*, 113 (1987) 1512.
- [15] R.H.J. Peerlings, R. de Borst, W.A.M. Brekelmans, J.H.P. de Vree, *Int. J of Numerical Methods in Engineering* 39 (1996) 3391.
- [16] R. Tovo, P. Livieri, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (7) (2008) 1804.
- [17] S. Capetta, R. Tovo, D. Taylor, P. Livieri, *International Journal of Fatigue*, 33 (2011) 661.
- [18] A. Cristofori, P. Livieri, R. Tovo, *International Journal of Fatigue*, 31(1) (2009) 12.
- [19] R. Tovo, P. Livieri, E. Benvenuti, *International Journal of Fracture*, 141 (2006) 497.
- [20] M. H. El Haddad, T.H. Topper, K. N. Smith. *ASME, J. of Engineering Material and Technology*, 101 (1979) 42.
- [21] Y.H. Zhang, S. J. Maddox, *International Journal of Fatigue*, 31 (2009) 1124.
- [22] L. Lopez Martinez, R. Lin, D. Wang, A.F. Blom, In: *Welded high-strength steel constructions*, A.F. Blom, editor UK: EMAS; (1997) 361.
- [23] M.M. Pedersen, O.Ø. Mouritsen, M.R. Hansen, J.G. Andersen, J. Wenderby, *Weld World*, 54(7/8) (2010).
- [24] M.M. Pedersen, O.Ø. Mouritsen, M.R. Hansen, J.G. Andersen, J. Wenderby, IIW document XIII-2272-09, (2009).
- [25] G. Marquis, *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (2010) 2051.
- [26] P. Livieri, R. Tovo. *International Journal of Fatigue*, 31 (1) (2009) 153.