

# FATICA OLIGOCICLICA DI GIUNZIONI SALDATE DI ACCIAI A BASSA RESISTENZA IMPIEGATI NELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

*G. Chiofalo, V. Crupi, E. Guglielmino*

DCIIM, Facoltà di Ingegneria, Università di Messina, Messina, Italia

E-mail: [giuseppe.chiofalo@ingegneria.unime.it](mailto:giuseppe.chiofalo@ingegneria.unime.it); [vcrupi@ingegneria.unime.it](mailto:vcrupi@ingegneria.unime.it); [eguglie@ingegneria.unime.it](mailto:eguglie@ingegneria.unime.it)

## SOMMARIO

La tecnica termografica è stata applicata in passato per investigare il comportamento a fatica ad alto numero di cicli di metalli e giunti saldati. In questo lavoro scientifico è stato analizzato l'incremento termico di giunti saldati soggetti a carichi di fatica a basso numero di cicli ed è stato rilevato un andamento simile a quello delle prove di fatica ad alto numero di cicli. Dalle prove sperimentali si evince che esiste una correlazione tra i valori di stabilizzazione degli incrementi termici e delle aree dei cicli di isteresi. Il comportamento a fatica oligociclica dei giunti saldati è stato, inoltre, confrontato con quello del materiale base, costituito da un acciaio al carbonio largamente impiegato nelle attrezzature a pressione.

## 1. INTRODUZIONE

Le apparecchiature a pressione possono essere soggette durante la loro vita a delle sollecitazioni variabili. Nonostante il fenomeno della fatica in tali apparecchiature sia noto da decenni, la relativa problematica è stata affrontata, finora, molto raramente; infatti le apparecchiature, che compongono gli impianti di stabilimenti che lavorano a ciclo continuo (come le raffinerie di petrolio), sono soggette generalmente a sollecitazioni che sono prodotte dalla pressione interna e che non hanno un andamento ciclico. Pertanto, tranne casi eccezionali (improvvisi variazioni di pressione, colpi d'ariete) o le fasi di fermata per manutenzione ed avviamento dell'impianto, tali apparecchiature lavorano ad una sollecitazione costante, corrispondente alla pressione di esercizio. Inoltre, anche considerando questi episodi, i cicli di carico ai quali può essere soggetto un impianto sono molto limitati. Il fenomeno della fatica ha, invece, una sensibile rilevanza in tutti i processi di tipo intermittente, poiché l'apparecchio viene messo in servizio e fermato anche più volte al giorno (ad esempio le autoclavi di sterilizzazione), oppure in quelli che, per la loro tipologia di servizio, sono necessariamente soggetti a delle sollecitazioni variabili, come i polmoni di smorzamento dei compressori alternativi, o a variazioni termiche cicliche durante il loro servizio, condizione che induce delle sollecitazioni variabili, sebbene di tipo secondario. In realtà molte rotture, che si verificavano in apparecchi di questo tipo, venivano spesso genericamente attribuite a saldature difettose, le quali venivano semplicemente riparate senza un tentativo serio di analizzarne le cause. In effetti, le conseguenze di una cricca di fatica non sono mai catastrofiche e gli organismi di controllo non hanno mai preteso che il problema venisse affrontato in sede di progetto, in particolare nei paesi, come l'Italia, dove non è mai esistita una normativa specifica.

L'entrata in vigore della Direttiva Europea 97/23, più comunemente nota come *PED* (*Pressure Equipment Directive*), ha cambiato questa situazione, facendo della verifica a fatica uno dei principi essenziali di sicurezza relativi alla progettazione. Tuttavia, proprio per i motivi sopra esposti, sia i dati in letteratura sia le indicazioni fornite nei vari codici di calcolo (*EN 13445*, *ASME VIII div. 2*) risultano essere carenti.

Questa problematica è attuale e trova applicazione anche in ambito navale per il trasporto di recipienti a pressione.

L'effetto della composizione chimica, dei trattamenti termici e della microstruttura nei confronti della suscettibilità all'*HIC* (*Hydrogen Induced Cracking*) è stato valutato su tre differenti acciai al carbonio del tipo *ASTM A 516 gr. 70* (*UNI EN 10028-3 P 355NH*) utilizzati per recipienti a pressione: un acciaio convenzionale e due acciai *HIC Resistant* [1]. Le prove sperimentali sono state condotte in accordo alla procedura prevista dalla *NACE TM 0284*. Inoltre è stata valutata, seguendo la procedura descritta dalla normativa *BS 7448*, la tenacità a frattura [1], definita mediante il parametro della Meccanica della Frattura del *CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*), ed è stata misurata la sua variazione in funzione dell'esposizione ad una soluzione che favorisce il caricamento di idrogeno del metallo. Tutte le prove sono state svolte sia su provini ricavati da metallo base, che contenenti un cordone di saldatura.

I giunti saldati rappresentano spesso il punto debole di una struttura o di un componente, pertanto sono stati sviluppati diversi metodi di previsione della loro resistenza a fatica [2, 3].

Nel presente lavoro di ricerca è stata fatta un'analisi a fatica di giunti saldati di acciai a bassa resistenza, del tipo *ASTM A 516 gr. 70*. Sono state condotte prove di fatica oligociclica per tener conto delle reali condizioni di funzionamento delle saldature. I risultati delle prove sperimentali sono stati confrontati con quelli ottenuti da analoghe prove condotte sul materiale base. Durante le prove di fatica, la temperatura superficiale dei provini è stata rilevata mediante una termocamera per valutare il riscaldamento superficiale ottenuto per i vari livelli di deformazione imposti.

La tecnica termografica è stata applicata in passato per investigare il comportamento a fatica ad alto numero di cicli di giunti saldati, utilizzati nelle costruzioni navali [3 - 5]. In questo lavoro scientifico è stato analizzato l'andamento termico di giunti saldati soggetti a carichi di fatica a basso numero di cicli (*Low Cycle Fatigue*) e l'incremento termico durante le prove è stato correlato ai corrispondenti cicli di isteresi.

## 2. MATERIALI E METODI

Le prove di fatica oligociclica sono state eseguite su giunti saldati di testa, realizzati in acciaio *ASTM A 516 gr. 70* (*UNI EN 10028-3 P 355NH*) e largamente impiegati nelle attrezzature a pressione. Le saldature sono state eseguite ad arco elettrico, con elettrodi tipo *E7018*. La composizione chimica e le proprietà meccaniche del materiale base sono riportate rispettivamente nelle tabelle 1 e 2.

**Tabella 1:** *Composizione chimica dell'acciaio (peso %).*

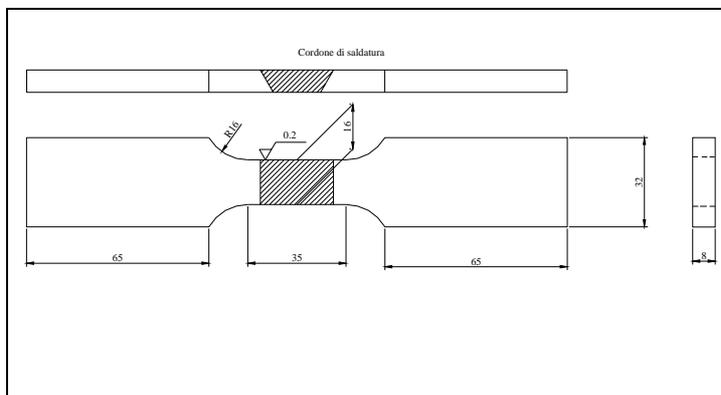
| C    | Mn   | P     | S     | Si   | Cu    | Ni   | Cr   | Mo    | Al    | Nb    | V     | Ti    |
|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.20 | 1.12 | 0.010 | 0.003 | 0.31 | 0.026 | 0.04 | 0.21 | 0.005 | 0.034 | 0.018 | 0.008 | 0.002 |

**Tabella 2:** Proprietà meccaniche dell'acciaio.

| <b>E</b> | <b>R<sub>p 0.2%</sub></b> | <b>R<sub>mUTS</sub></b> | <b>Allungamento in 200 mm</b> |
|----------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| [GPa]    | [MPa]                     | [MPa]                   | [%]                           |
| 210      | 379                       | 544                     | 27                            |

Le prove sperimentali sono state condotte in controllo di deformazione in accordo con la normativa dell'*ASTM E606* [6] su provini ad osso di cane, la cui geometria è riportata in Figura 1. È stata utilizzata una macchina di prova universale *MTS 810 System* con cella di carico da 250 kN. Sono stati applicati differenti livelli di deformazione  $\Delta\varepsilon$  nel range 0.2 – 0.6 % con rapporto di deformazione  $R_\varepsilon = -1$  e differenti valori di frequenza nel range 1 – 2 Hz tali da mantenere una velocità di deformazione costante pari a  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Le deformazioni longitudinali sono state misurate durante le prove mediante un estensimetro, montato sul provino con una distanza tra i coltelli pari a 25 mm.

Le superfici dei provini sono state verniciate di nero ed un panno nero è stato posto dietro il provino per aumentare il contrasto tra la temperatura del provino e quella dell'ambiente esterno. Per rilevare l'andamento della temperatura superficiale del provino durante tutta la prova, è stata acquisita un'immagine ogni 5 s da uno scanner termico (modello *A40M della Flynr System*) (Fig. 2). La termocamera, che ha una risoluzione termica inferiore a  $0.08 \text{ }^\circ\text{C}$ , è stata posizionata ad una distanza di circa 0.3 m. Le immagini termografiche, che hanno una risoluzione di  $320 \times 240 \text{ pixels}$ , sono state analizzate mediante il software *ThermaCAM Researcher*.



**Figura 1:** Geometria dei provini.



**Figura 2:** Set - up sperimentale.

### 3. ANALISI DEI RISULTATI

Le prove sperimentali hanno permesso di ottenere i seguenti risultati per i giunti saldati ed il materiale base:

- cicli di isteresi di stabilizzazione,
- curva  $\varepsilon-N$ ,
- curva ciclica  $\sigma-\varepsilon$ ,
- curve  $\Delta T-N$ ,
- valori asintotici degli incrementi termici  $\Delta T_{AS}$ .

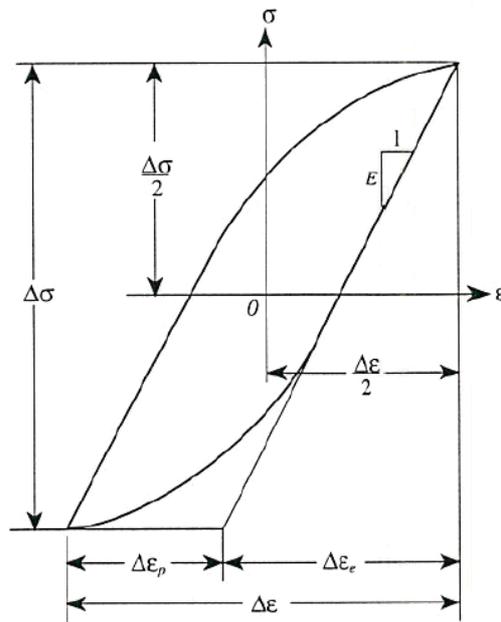
### 3.1 Cicli di isteresi di stabilizzazione

Sono stati definiti come cicli di isteresi di stabilizzazione quelli corrispondenti a metà della vita a fatica, in accordo alla normativa dell'*ASTM E606* [6].

Il *range* di deformazione plastica  $\Delta\varepsilon_p$  è stato valutato come la larghezza dei cicli di isteresi di stabilizzazione misurata lungo l'asse delle deformazioni (Fig. 3), mentre la porzione elastica  $\Delta\varepsilon_e$  è stata determinata come differenza tra la deformazione totale imposta e quella plastica:

$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_p \quad (1)$$

Il *range* di tensione  $\Delta\sigma$  è stato calcolato moltiplicando la deformazione elastica per il valore del modulo elastico  $E$ , che è stato ottenuto sperimentalmente essere pari a 190 GPa per i giunti saldati e 210 MPa per il materiale base.

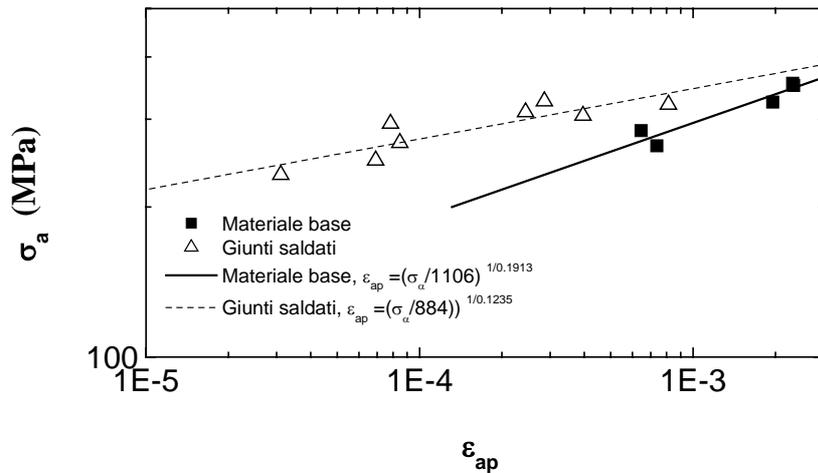


**Figura 3:** Ciclo di isteresi.

La deformazione plastica  $\Delta\varepsilon_p$  è legata alla tensione applicata  $\Delta\sigma$  mediante la seguente espressione:

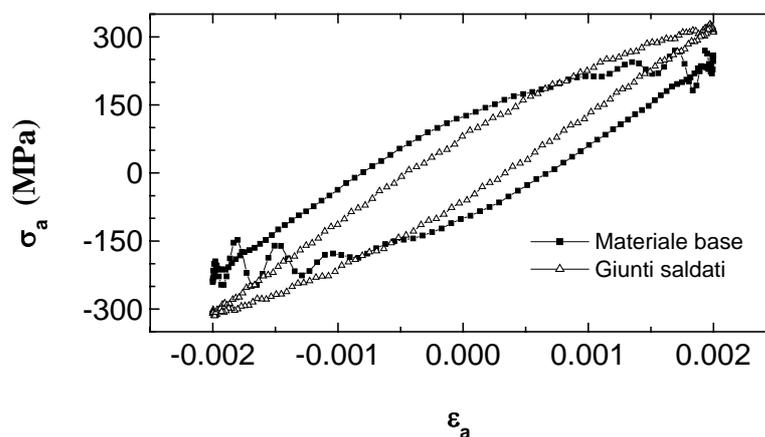
$$\varepsilon_{ap} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \left( \frac{\Delta\sigma}{2 \cdot K'} \right)^{\frac{1}{n'}} = \left( \frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2)$$

I due parametri  $K'$  e  $n'$  sono stati determinati diagrammando in scala logaritmica l'ampiezza di deformazione plastica  $\varepsilon_{ap}$  in funzione dell'ampiezza di tensione  $\sigma_a$  (Fig. 4).



**Figura 4:** Curve  $\sigma_a$ - $\varepsilon_{ap}$  per materiale base e giunti saldati.

La presenza di una zona di saldatura produce, rispetto al materiale base, una riduzione della deformazione plastica ed un incremento delle tensioni per la presenza di zone di concentrazioni delle tensioni dovute alla saldatura stessa. Questo comportamento si evince, anche, analizzando i cicli di isteresi di stabilizzazione. In Figura 5 sono mostrati i cicli di isteresi di stabilizzazione relativi ai giunti ed al materiale base a parità di deformazione applicata ( $\Delta\varepsilon = 0.4\%$ ).

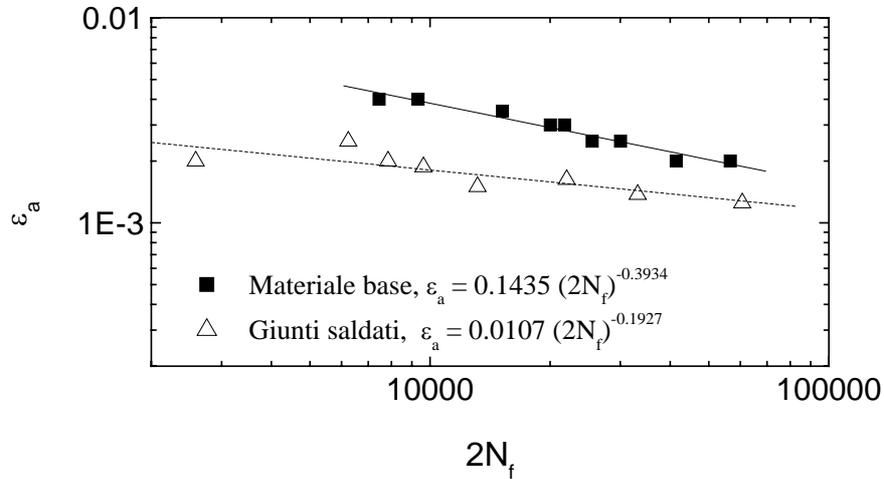


**Figura 5:** Cicli di isteresi per materiale base e giunti saldati ( $\Delta\varepsilon = 0.4\%$ ).

### 3.2 Curve $\varepsilon$ - $N$

Le curve  $\varepsilon$ - $N$  relative al materiale base ed ai giunti saldati sono state valutate in accordo alla normativa *ASTM E739* [7]. In Figura 6 sono diagrammate le ampiezze di deformazione  $\varepsilon_a$  in funzione del numero di alternanze a rottura  $2N_f$ . L'analisi delle curve  $\varepsilon_a$ - $2N_f$ , riportate in Fig.

6, dimostra che i giunti saldati presentano una significativa riduzione della resistenza a fatica oligociclica rispetto al metallo base.



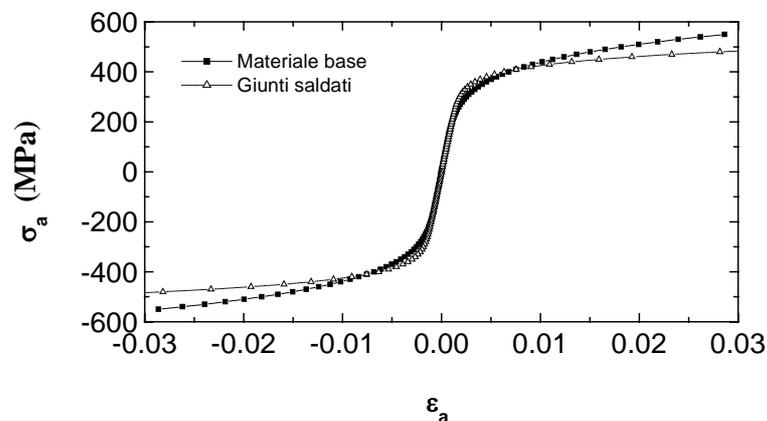
**Figura 6:** Curve  $\varepsilon_a-2N_f$  per materiale base e giunti saldati.

### 3.3 Curve cicliche $\sigma-\varepsilon$

L'equazione della curva ciclica  $\sigma-\varepsilon$  è espressa dalla seguente relazione:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2 \cdot E} + \left( \frac{\Delta\sigma}{2 \cdot K'} \right)^{\frac{1}{n'}} = \frac{\sigma_a}{E} + \left( \frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (3)$$

Il diagramma in Figura 7 mostra le curve cicliche per materiale base e giunti saldati, ottenute applicando l'eq. (3).



**Figura 7:** Curve cicliche  $\sigma_a-\varepsilon_a$  per materiale base e giunti saldati.

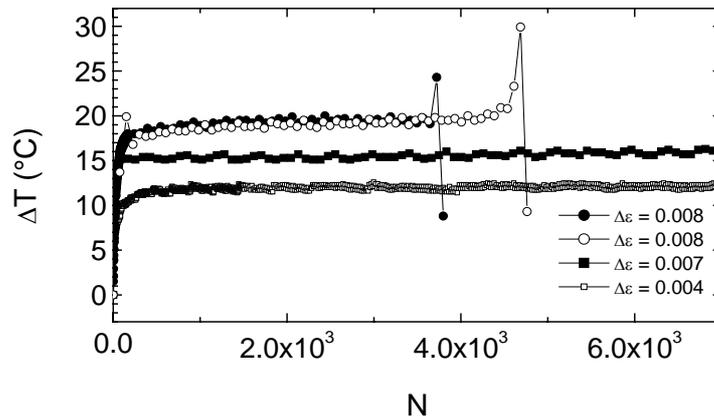
### 3.4 Analisi termografica

Da tutte le prove sperimentali di fatica ad alto numero di cicli, condotte in passato [3 - 5], sono state rilevate tre fasi distinte nelle curve  $\Delta T-N$  relative all'incremento termico di un provino soggetto a carichi dinamici superiori al valore del limite di fatica.

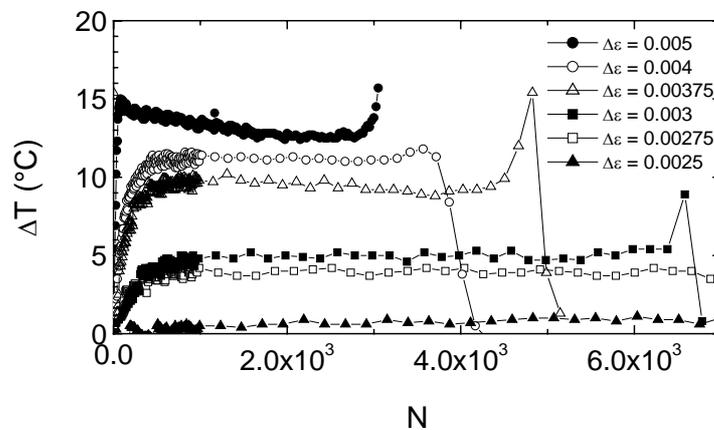
Quando un provino è caricato ciclicamente sopra il suo limite di fatica, la sua temperatura superficiale aumenta rapidamente in una prima fase iniziale (fase I), quindi la variazione termica raggiunge un valore quasi asintotico  $\Delta T_{AS}$  (fase II) ed infine si ha un brusco incremento, portando alla frattura dopo pochi cicli (fase III).

Nelle Figure 8 e 9 sono diagrammate le curve  $\Delta T-N$ , corrispondenti a provini con e senza saldatura soggetti a differenti livelli di deformazione, e le sopra citate tre fasi risultano essere presenti anche in queste prove di fatica oligociclica.

Come si evince dalle curve, la temperatura di stabilizzazione viene raggiunta dopo pochi cicli e viene mantenuta circa costante fino a pochi cicli prima della rottura.

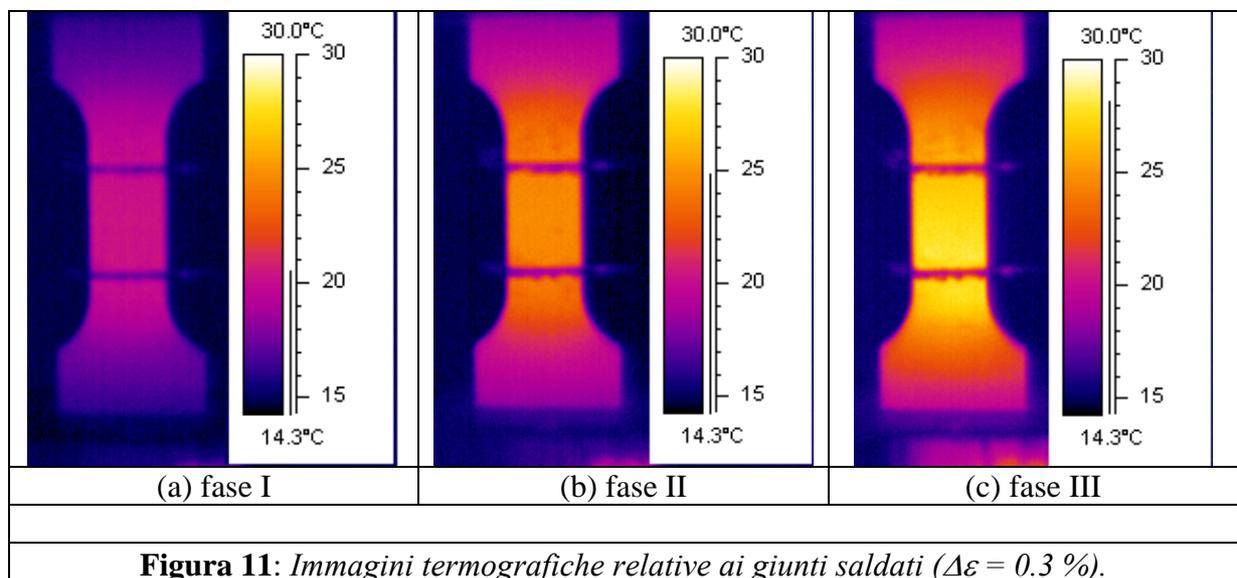
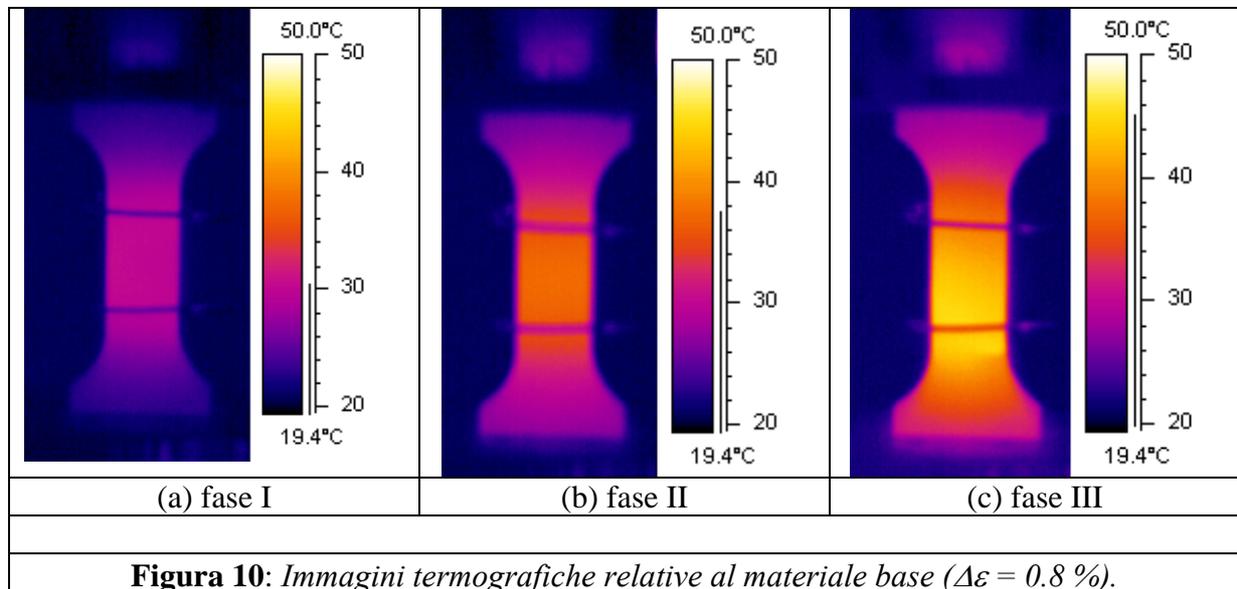


**Figura 8:** Curve  $\Delta T-N$  per materiale base.



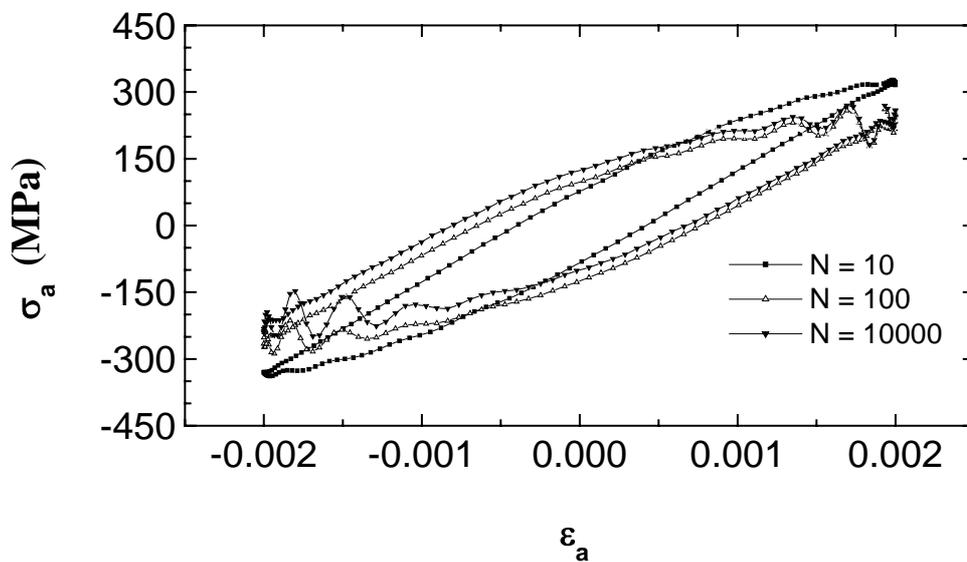
**Figura 9:** Curve  $\Delta T-N$  per giunti saldati.

Le immagini termografiche a differenti cicli di fatica, corrispondenti alle tre fasi delle curve  $\Delta T-N$ , sono mostrate nelle Figure 10 e 11.

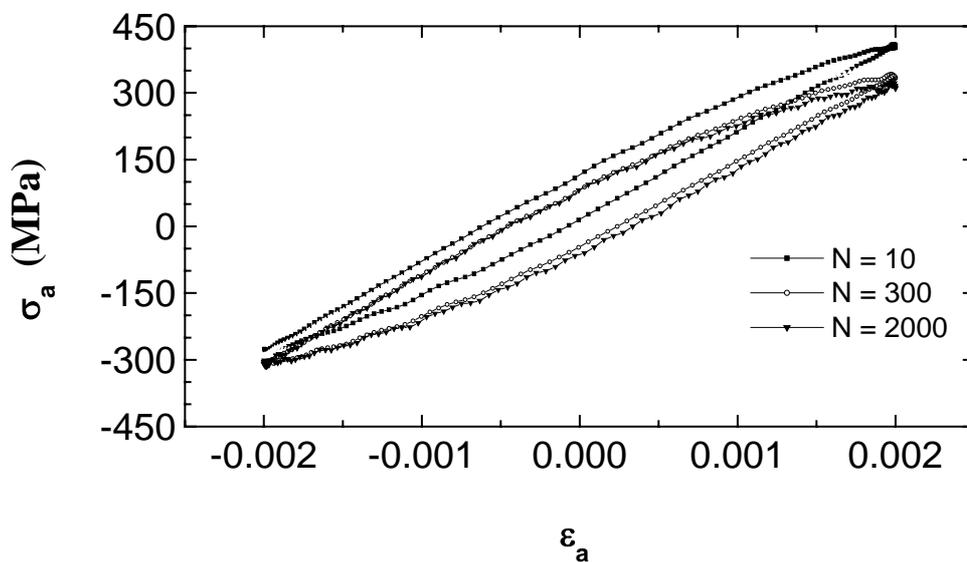


I cicli di isteresi a differenti cicli di fatica  $\Delta W(N)$ , relativi a due prove condotte ad una deformazione  $\Delta\varepsilon = 0.4\%$  su materiale base e giunti saldati, sono riportati nelle Figure 12 e 13. Come si evince dalle Figure, i cicli di isteresi di stabilizzazione sono raggiunti dopo pochi cicli di fatica e non subiscono variazioni significative nella forma e nelle dimensioni sino alla rottura, analogamente a quanto avviene per l'incremento termico asintotico  $\Delta T_{AS}$ .

Da queste prove sperimentali di LCF si evince che esiste una correlazione tra gli incrementi termici asintotici  $\Delta T_{AS}$  e le aree dei cicli di isteresi di stabilizzazione  $\Delta W$ .



**Figura 12:** Cicli di isteresi del materiale base ( $\Delta\varepsilon = 0.4\%$ ).



**Figura 13:** Cicli di isteresi dei giunti saldati ( $\Delta\varepsilon = 0.4\%$ ).

#### 4. CONCLUSIONI

1. Parametri e curve relative alla *LCF* sono state determinati sperimentalmente per un acciaio *ASTM A 516 gr. 70* e per giunti saldati dello stesso materiale. La loro conoscenza è utile per poter fare delle previsioni della vita a fatica di componenti

- strutturali ed attrezzature a pressione, realizzati nello stesso materiale e soggetti a carichi dinamici *random* durante il loro servizio.
2. Il comportamento a fatica oligociclica dei giunti saldati è stato confrontato con quella del materiale base. Rispetto al metallo base, i giunti saldati presentano una minore deformazione plastica ed un incremento delle tensioni con una conseguente riduzione della vita a fatica.
  3. L'incremento termico, riscontrato in passato nelle prove di *HCF* e caratterizzato da tre fasi con una temperatura di stabilizzazione, è stato rilevato anche nelle prove di *LCF*.
  4. L'incremento termico ed i cicli di isteresi di un acciaio sono correlati, poiché sono entrambi manifestazioni di processi di dissipazione di energia in metalli soggetti a carichi di fatica.

### **Bibliografia**

- [1] Chiofalo G., Guglielmino E., Gazzotti V. (2008) Caratterizzazione di acciai al carbonio per recipienti a pressione al servizio di "H2S umido. 32° Convegno Nazionale AIM. Ferrara. 24-26 Settembre 2008.
- [2] Crupi G., Crupi V., Guglielmino E., Taylor D. (2005) Fatigue assessment of welded joints using critical distance and other methods. *Engineering Failure Analysis*. **12** (1), 129-142.
- [3] Crupi V., Guglielmino E., Risitano A., Taylor D. (2007) Different methods for fatigue assessment of T welded joints used in ship structures. *Journal of Ship Research*. **51** (2), 150-159.
- [4] Crupi V., Marinò A., Biot M., Risitano G. (2007) Fatigue Prediction By Thermographic Method of Aluminum Alloy 6082 Panels: Comparison Between Fsw and Mig Welding. *Journal of Ship Production*. **23** (4), 215-222.
- [5] Crupi V., Guglielmino E., Maestro M., Marinò A. (2008) Indagini sperimentali termografiche per la caratterizzazione a fatica di giunti di testa in acciaio e confronto con le normative vigenti. III Convegno SEA-MED 2008, 217-228, Messina, 4 Luglio 2008.
- [6] ASTM E 606-92. (1998) Standard Practice for Strain - Controlled Fatigue Testing.
- [7] ASTM E 739-91. (2004) Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data.