

## INFLUENZA DEL RAPPORTO DI CARICO SUL COMPORTAMENTO A FATICA DI GIUNTI SALDATI UTILIZZATI IN CAMPO NAVALE

G. Chiofalo<sup>a</sup>, V. Crupi<sup>a</sup>, E. Guglielmino<sup>a</sup>

<sup>a</sup>DCIIM, Università di Messina, Contrada Di Dio (S. Agata) - 98166 Messina, 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

Obiettivo del lavoro di ricerca è la previsione del comportamento a fatica di giunti saldati in lega di alluminio al variare del rapporto di carico  $R$ . I metodi tradizionali, implementati all'interno delle normative correnti, forniscono risultati spesso conservativi. In particolare è stato analizzato il comportamento a fatica di giunti saldati a T, adoperati in strutture navali e realizzati in lega di alluminio AlMg4.5Mn (AA5083). Le prove sperimentali sono state eseguite a differenti valori del rapporto di carico  $R$ . Dall'analisi delle curve  $S-N$  è stato possibile calcolare il fattore  $f(R)$  ed i valori ottenuti sono stati confrontati con quelli riportati dalle normative dell'*Eurocodice 9* e dell'*International Institute of Welding*. Le prove a fatica sono state riprese con una termocamera ad infrarossi per rilevare la variazione della temperatura radiometrica superficiale dei giunti. Dall'analisi delle immagini termiche è stato possibile, mediante il Metodo Termografico, valutare il valore della resistenza a fatica. Le previsioni, ottenute applicando il Metodo Termografico, sono risultate buone con bassi errori percentuali rispetto ai valori di resistenza a fatica estrapolati dalle curve sperimentali  $S-N$ , tenendo conto anche della dispersione statistica dei dati insita nelle prove a fatica.

### ABSTRACT

This paper is focused on the fatigue behaviour of aluminium alloy welded joints, which can represent regions of weakness in the ship structure. Experimental tests were carried out on T-shaped aluminium alloy welded joints to analyse the influence of stress ratio  $R$ . The T-shaped welded joints analysed are used in ship structures and are made of AlMg4.5Mn aluminium alloy (AA5083). The fatigue enhancement factor  $f(R)$  was assessed by the experimental tests and compared with code recommendations. The traditional methods for fatigue assessment of welded joints, widely used in accordance with the current guidelines of the *International Institute of Welding* and *Eurocode 9*, have some limitations and are extremely conservative. In order to overcome these difficulties, the Thermographic Method, based on thermographic analysis, have been applied to predict the fatigue behaviour of welds. Fatigue predictions obtained resorting to the Thermographic Method show a good agreement with those derived from the traditional procedure, taking into account also the typical fatigue data scattering.

### 1. INTRODUZIONE

Le saldature rappresentano spesso le zone critiche di una struttura per la presenza di concentrazione delle tensioni e di tensioni residue ed è difficile predirne il comportamento a causa della difficoltà di definire la qualità, la geometria e le proprietà del materiale della saldatura.

Criteri chiari di progettazione sono, pertanto, fondamentali per evitare nelle zone saldate la formazione di cricche di fatica, da cui si può innescare la frattura.

Le normative correnti, come l'*International Institute of Welding (IIW)* [1] e gli *Eurocodici 3 e 9* [2, 3], si basano sull'assunzione che le curve  $S-N$  di giunti saldati con differenti geometrie presentano circa la

stessa pendenza a parità di materiale. Quindi, per ogni tipologia di giunto, è possibile definire la sua classe a fatica *FAT* (*fatigue class*) come il valore di tensione corrispondente a  $2 \times 10^6$  cicli.

I valori riportati dalle normative si riferiscono ad una probabilità di sopravvivenza  $P_s = 97.5\%$  e ad un rapporto di carico  $R=0.5$  e sono spesso molto conservativi [4].

Per tali motivi, si è pensato di applicare nuovi metodi di previsione della resistenza a fatica dei giunti saldati: il *Crack Modelling Method* (CMM) [5], i *Critical Distance Methods* (CDM) [5] ed il Metodo Termografico [6].

Il Metodo Termografico è stato applicato con successo in passato: per determinare il limite di fatica di provini o componenti meccanici in acciaio [6, 7], di giunti saldati [8-10], per valutare l'effetto di intaglio sul limite di fatica di provini in superlega di Nickel [11], per valutare le correlazioni tra i parametri termici (variazione di temperatura) e quelli energetici della Meccanica della Frattura (*J integral*) [12], per trovare una relazione tra l'incremento termico in un provino metallico, soggetto a carichi ciclici, ed il suo smorzamento specifico [13] e per valutare l'effetto termoplastico [14].

Secondo questo metodo, il limite di fatica corrisponde al massimo valore di tensione che produce un incremento termico nullo su tutta la superficie del provino rispetto alla sua temperatura iniziale.

L'applicazione del metodo presenta difficoltà maggiori nel caso di componenti realizzati in alluminio o leghe di alluminio, in quanto questi materiali subiscono una minore variazione termica rispetto all'acciaio quando sono sollecitati da carichi dinamici.

Come detto sopra, le curve *S-N*, riportate nelle correnti normative, si riferiscono a rapporti di carico  $R=0.5$  per tener conto dell'influenza degli sforzi residui. Per  $R < 0.5$ , un fattore  $f(R)$  deve essere considerato moltiplicando la classe di fatica del dettaglio in esame per  $f(R)$  [1-3]:

$$\begin{aligned} f(R) &= 1.6 && \text{per } R < -1 \\ f(R) &= -0.4 \cdot R + 1.2 && \text{per } -1 \leq R \leq 0.5 \\ f(R) &= 1 && \text{per } R > 0.5 \end{aligned} \quad (1)$$

Uno degli obiettivi del presente studio è stato quello di valutare, sperimentalmente, l'influenza del rapporto di carico  $R$  sul comportamento a fatica di giunti saldati in lega di alluminio.

## 2. MATERIALI E METODI

Sono state eseguite prove sperimentali a differenti valori del rapporto di carico  $R$  per determinare il fattore  $f(R)$ , che è stato definito come il valore di *FAT* per  $R < 0.5$  normalizzato rispetto al valore di *FAT* per  $R=0.5$ :

$$f(R) = \frac{FAT(R < 0.5)}{FAT(R = 0.5)} \quad (2)$$

I valori di  $f(R)$  così ottenuti sono stati confrontati con quelli riportati dalle normative dell'*I/W* e dell'*Eurocodice 9* in accordo alle formule (1).

Alcune prove a fatica sono state riprese con una termocamera ad infrarossi per applicare il Metodo Termografico.

### 2.1 Metodo Termografico

Secondo il Metodo Termografico, il limite di fatica corrisponde al più alto valore di tensione  $\Delta\sigma_{eTM}$  in corrispondenza del quale l'incremento termico è nullo su tutta la superficie del provino rispetto alla temperatura iniziale [6]. Quando un provino è soggetto a tensioni cicliche superiori al suo limite di fatica, la sua temperatura superficiale cresce rapidamente in una fase iniziale, quindi la variazione termica raggiunge un valore asintotico  $\Delta T_{AS}$  ed infine si ha un repentino incremento termico appena le deformazioni plastiche diventano rilevanti, portando alla rottura in pochi cicli (Fig. 1).

Secondo il Metodo Termografico, il limite di fatica può essere ottenuto diagrammando il valore asintotico  $\Delta T_{AS}$  in funzione del quadrato dell'ampiezza di tensione applicata  $\Delta\sigma^2$  (in alternativa il  $\Delta T/\Delta N$  versus  $\Delta\sigma$ ) e determinando il valore del limite di fatica  $\Delta\sigma_{eTM}$  dall'intersezione con l'asse delle ascisse della curva che interpola linearmente i dati  $\Delta T_{AS}-\Delta\sigma^2$  dove risulta  $\Delta T_{AS}=0$  ovvero  $\Delta T/\Delta N=0$  (Figure 2 e 3) [6].

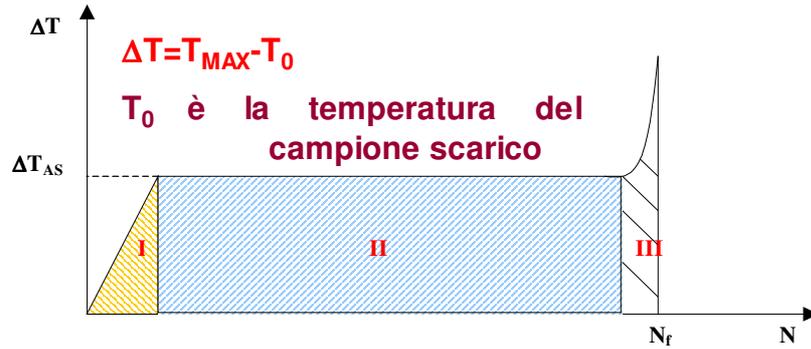


Fig. 1 – Curva  $\Delta T - N$  teorica

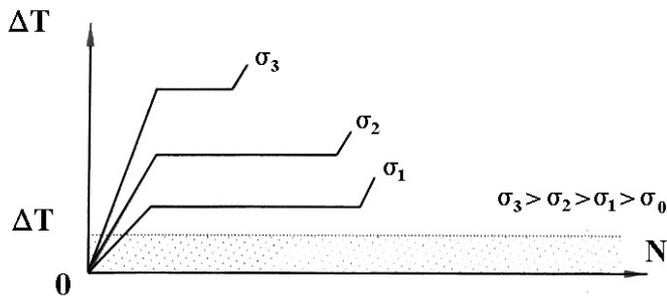


Fig. 2 – Curve  $\Delta T - N$  per diversi valori di tensione

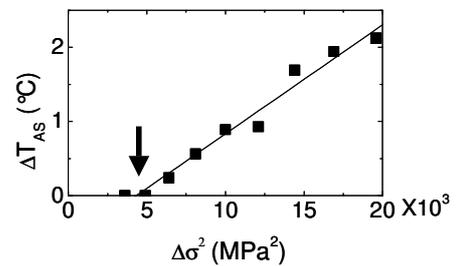


Fig. 3 – Curva  $\Delta T_{AS} - \Delta \sigma^2$

Il Metodo Termografico è stato già applicato con successo dagli autori per valutare la resistenza a fatica di giunti saldati, utilizzati nelle strutture navali e realizzati in lega di alluminio [8, 9] ed in acciaio ad alta resistenza [10].

## 2.2 Descrizione delle prove sperimentali

Sono stati analizzati giunti saldati a T, adoperati in strutture navali e realizzati in lega di alluminio AIMg4.5Mn, denominata AA5083 (4-4.9% Mg, 0.4% Si, 0.4% Fe, 0.4-1% Mn, 0.25 % Zn, 0.15 % Ti, 0.1% Cu, 0.05-0.25 % Cr, carico di snervamento pari a 255 MPa). La lega di alluminio AA5083 è particolarmente adatta per applicazioni marine grazie ad alcune sue proprietà come il basso costo, la buona resistenza alle sollecitazioni meccaniche ed alla corrosione.

In Figura 4 è riportata la geometria dei giunti in esame, che hanno una larghezza di 50 mm ed uno spessore della lamiera base di 7 mm.

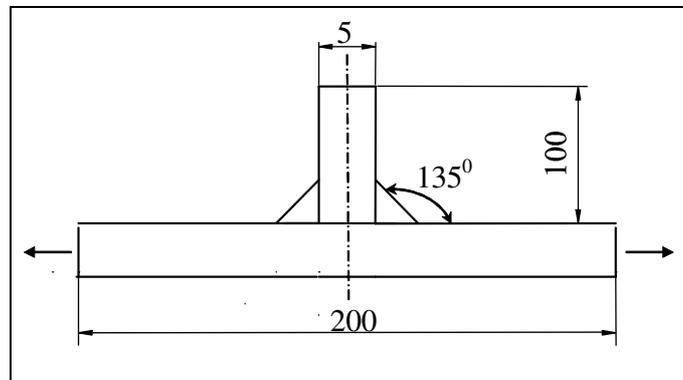


Fig. 4 – Geometria dei giunti analizzati

Le sperimentazioni sono state eseguite con una macchina di prova universale *MTS 810 System* (Fig. 5) con cella di carico da 250 kN.

Preliminarmente sono state eseguite delle prove statiche di trazione su due giunti saldati ad una velocità di spostamento di 2 mm/min; i risultati delle prove sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1 – Risultati delle prove statiche

	E	$\sigma_r$	$\sigma_y$	$\epsilon_R$
	MPa	MPa	MPa	%
Test 1	20278	344	320	18
Test 2	21374	334	288	17.5

Nelle prove di fatica sono stati applicati carichi assiali ciclici alla frequenza di 20 Hz ed a diversi valori del rapporto di carico  $R = -1, 0.1, 0.5$ . Per ogni prova sono stati applicati carichi ad ampiezza costante fino alla frattura. Sono state interrotte le prove nelle quali non si erano verificati fenomeni di frattura entro i  $5 \times 10^6$  cicli. In particolare sono stati considerati differenti livelli di ampiezza di tensione  $\Delta\sigma$  nel range 50-160 MPa per poter determinare le curve  $S-N$ .

Le prove sperimentali sono state riprese da uno scanner termico (modello *A40M della Flyn System*) per rilevare l'andamento della temperatura superficiale del provino durante tutta la prova (Fig. 5). La termocamera ha una risoluzione termica inferiore a 0.08 °C ed è stata posizionata ad una distanza di circa 0.4 m. Un panno nero è stato posto dietro il provino per evidenziare il contrasto esistente tra la temperatura del provino e quella dell'ambiente esterno. È stata acquisita una immagine ogni 25 s. Nelle prove lunghe (oltre  $1 \times 10^6$  cicli) è stata cambiata durante la prova la frequenza di acquisizione ad una immagine ogni 5 minuti. Le immagini termografiche sono state analizzate mediante il software *ThermaCAM Researcher*. L'immagine digitalizzata contiene 320x240 pixels. Il parametro fondamentale è la variazione termica  $\Delta T$  tra la temperatura massima sulla superficie del campione durante la prova rispetto alla sua temperatura iniziale prima dell'applicazione del carico.

Il Metodo Termografico si basa sulla valutazione del valore asintotico  $\Delta T_{AS}$  della variazione termica  $\Delta T$ , ricavato dall'analisi delle curve  $\Delta T-N$ , relative alle diverse prove sperimentali.



Fig. 5 – Set-up sperimentale

### 3 RISULTATI E DISCUSSIONE

Il limite di fatica per  $R=0.1$  dei giunti saldati a T in AA5083 è stato calcolato sperimentalmente applicando la procedura *staircase* su 15 provini (Fig. 6) [5]. Il limite di fatica, corrispondente ad una probabilità di frattura del 50 %, è risultato pari a 61.2 MPa con una deviazione standard di 3.2 MPa [5].

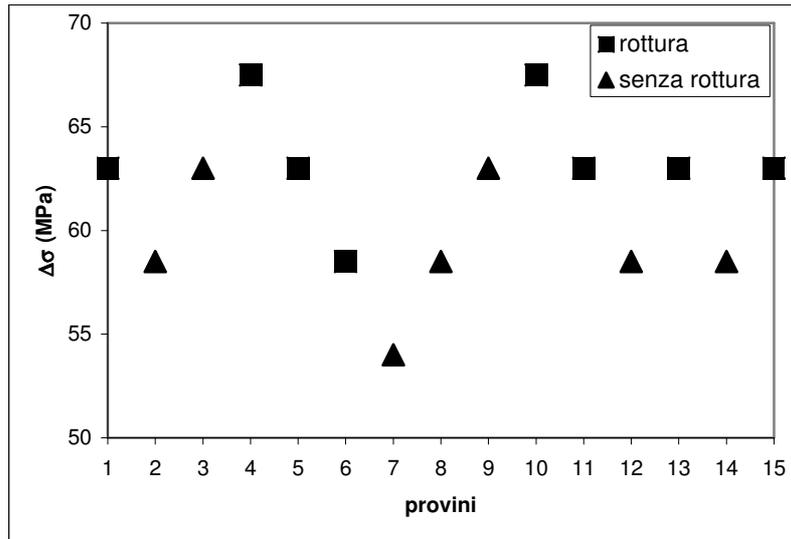


Fig. 6 – Risultati del metodo *staircase* per  $R=0.1$

La frattura dei giunti, sollecitati a fatica, si è avuta in corrispondenza dell'apice del cordone di saldatura, dove si hanno gli effetti di concentrazione della tensione; i giunti rotti presentano la tipica superficie di frattura per fatica con una zona liscia ed una zona frastagliata.

Le prove sperimentali, condotte a differenti valori di rapporto di carico  $R$ , hanno permesso di ottenere le curve  $S-N$  che sono riportate in scala semi-logaritmica in Figura 7. I dati sperimentali sono stati interpolati in scala doppio logaritmica mediante una funzione lineare e sono stati determinati i simmetrici  $m$  dei reciproci delle pendenze delle rette ed i valori della  $FAT$  e del limite di fatica  $\Delta\sigma_{eSN}$ , determinati estrapolando dalle curve  $S-N$  i valori di tensione, rispettivamente, a  $2 \times 10^6$  ed a  $5 \times 10^6$  cicli.

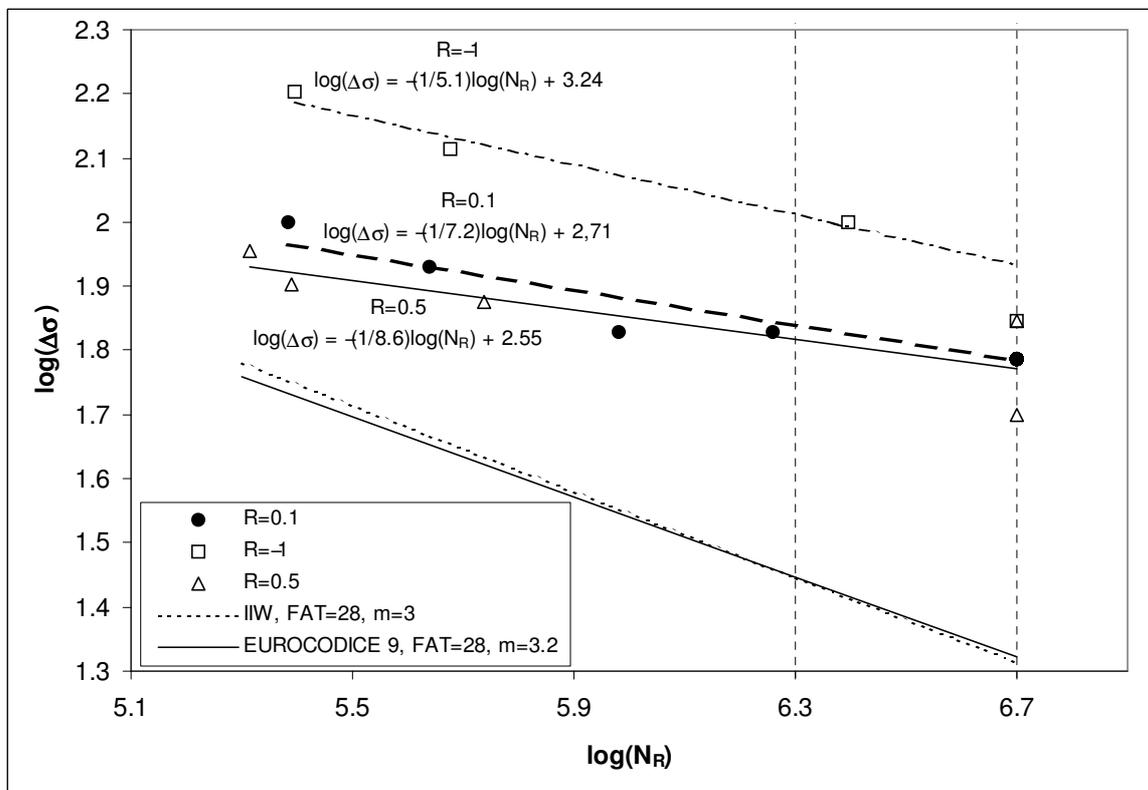


Fig. 7 – Curve  $S-N$  per differenti valori di rapporto di carico  $R$

Relativamente al confronto con le normative, la classe di fatica, corrispondente alla tipologia di giunto in esame, è la FAT 28 con  $m=3$  per l'*IIW* [1] e la FAT 28 con  $m=3.2$  per l'*Eurocodice 9* [3]. Dal confronto con i valori sperimentali delle curve *S-N*, come si evince dalla Figura 7 e dalla Tabella 2, risulta che le normative dell'*IIW* e dell'*Eurocodice 9* sono molto conservative.

Tabella 2 – Risultati delle prove sperimentali

Rapporto di carico $R$	Pendenza $m$	FAT [MPa]	Resistenza a fatica $\Delta\sigma_{eSN}$ [MPa]	$f(R)$	
				normative	prove sperimentali
-1	5.1	103	86	1.60	1.46
0.1	7.2	69	61	1.16	1.03
0.5	8.5	66	59	1	1

Dall'analisi dei risultati sperimentali riportati in Tabella 2 ed in Figura 8, si evince che il fattore  $f(R)$  non varia linearmente con il rapporto di carico  $R$ , come definito dall'equazione (1) riportata in alcuni codici [1-3] e che non vi è una sostanziale differenza tra i valori di  $f(R)$  per  $R=0.1$  ed  $R=0.5$ , come risulta anche dalle curve *S-N* riportate in Figura 7. Interpolando i dati sperimentali di  $f(R)$  in funzione di  $R$ , si determina che la funzione che meglio ne approssima l'andamento è un polinomio di secondo grado (Fig. 8).

In conclusione le previsioni del fattore  $f(R)$ , riportate nelle normative dell'*IIW* [1] e degli Eurocodici [2, 3], non sono giustificate dai dati sperimentali, in particolare il valore di  $f(R)$  per  $R=0.1$ .

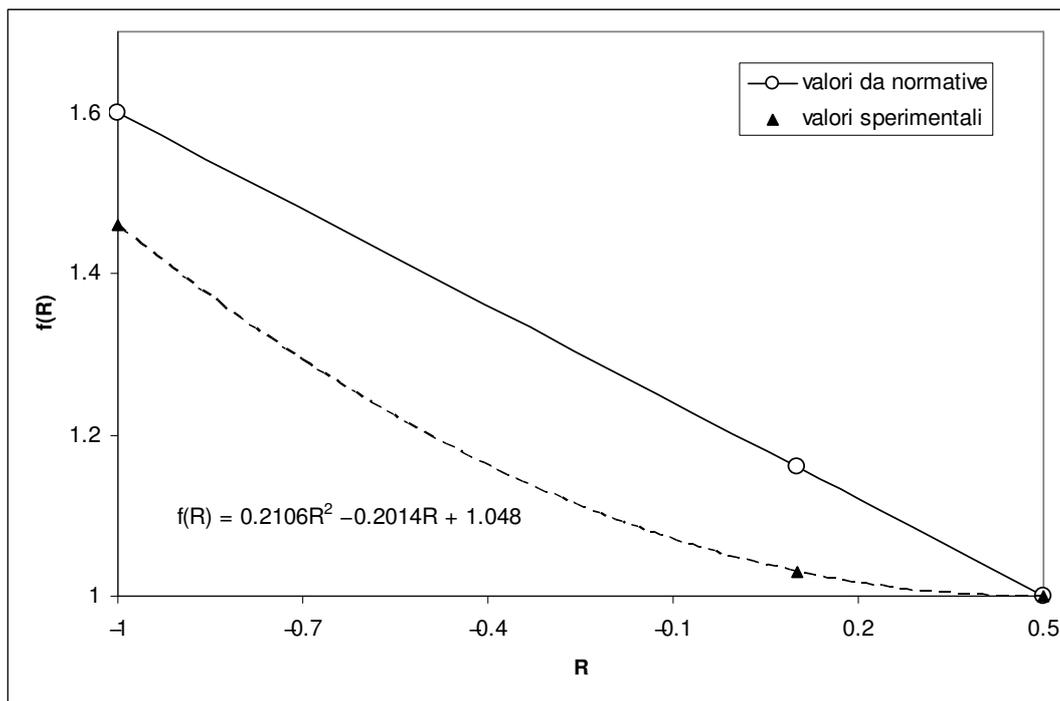


Fig. 8 –Curve  $f(R) - R$  ottenute dalle prove sperimentali e dalle normative

Inoltre dall'analisi delle immagini termografiche è stato possibile, mediante il Metodo Termografico, valutare il valore della resistenza a fatica  $\Delta\sigma_{eTM}$ .

Poiché, come detto sopra, l'incremento termico nell'alluminio e nelle sue leghe non è così pronunciato come negli acciai, esso è influenzato della variazione termica dell'ambiente esterno che si ha nelle prove, in particolare in quelle ad alto numero di cicli che durano diverse ore. Per tale motivo sono state considerate solo le prove nelle quali si è riscontrato un andamento della temperatura durante la prova riconducibile a quello teorico definito in Figura 1.

In Figura 9 sono riportati, per le prove a differenti livelli di rapporto di carico  $R$ , i valori delle temperature asintotiche  $\Delta T_{AS}$  in funzione del quadrato della tensione applicata  $\Delta\sigma^2$ . I dati sperimentali sono stati interpolati mediante una funzione lineare e la resistenza a fatica dei giunti è stata valutata come il valore di tensione massimo  $\Delta\sigma_{eTM}$  cui corrisponde un incremento termico nullo  $\Delta T_{AS} = 0$ .

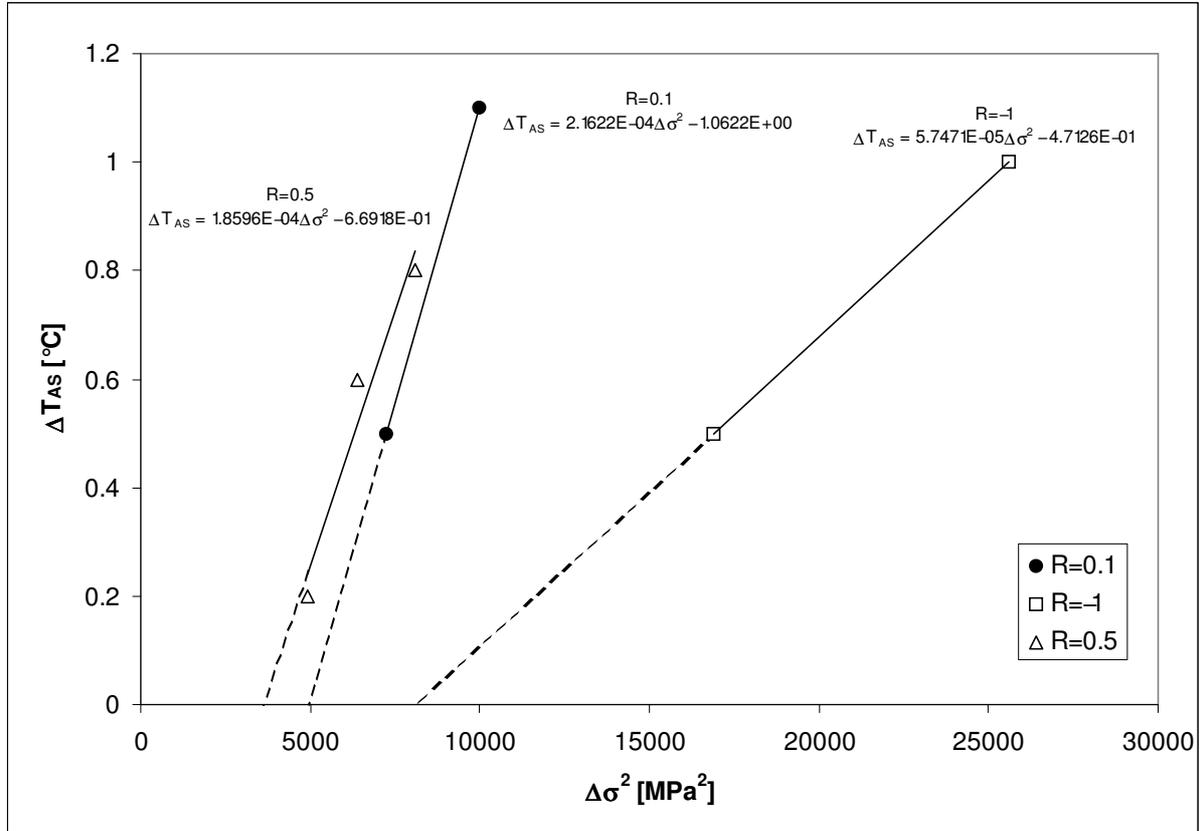


Fig. 9 - Curve  $\Delta T_{AS}-\Delta\sigma^2$  per differenti valori di rapporto di carico  $R$

In Tabella 3 sono riportati i valori di resistenza a fatica ottenuti applicando il Metodo Termografico e l'errore percentuale  $\delta\%$  rispetto al valore sperimentale, definito mediante la seguente formula:

$$\delta\% = 100 \frac{(\Delta\sigma_{eTM} - \Delta\sigma_{eSN})}{\Delta\sigma_{eSN}} \quad (3)$$

dove  $\Delta\sigma_{eTM}$  è la previsione di resistenza a fatica ottenuto con il Metodo Termografico e  $\Delta\sigma_{eSN}$  è il valore della resistenza a fatica ottenuto dalle curve  $S-N$  a  $5 \times 10^6$  cicli (Fig. 7).

Tabella 3 – Previsioni dei valori di resistenza a fatica

Rapporto di carico	Resistenza a fatica [MPa]		Errore percentuale
$R$	$\Delta\sigma_{eSN}$	$\Delta\sigma_{eTM}$	$\delta\%$
-1	86	91	5.8
0.1	61	70	14.8
0.5	59	60	1.7

Le previsioni, ottenute applicando il Metodo Termografico, sono risultate buone con errori percentuali inferiori al 15% rispetto ai valori sperimentali di tensione corrispondenti a  $5 \times 10^6$  cicli, ottenuti estrapolando i valori dalle curve *S-N* riportate in Figura 7. A conferma della bontà dei risultati, si deve tener anche in conto della dispersione statistica dei dati insita nelle prove a fatica ed in particolare nelle leghe di alluminio.

#### 4. CONCLUSIONI

Le principali conclusioni del presente studio possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

1. le prove sperimentali eseguite a differenti valori del rapporto di carico *R* hanno dimostrato che non vi è una sostanziale differenza tra le curve *S-N* per  $R=0.1$  e per  $R=0.5$ ;
2. dall'analisi dei dati sperimentali risulta che l'andamento del coefficiente  $f(R)$  in funzione del rapporto di carico *R* non è proprio lineare come previsto dalle normative dell'*IIIW* e dell'*Eurocodice 9*;
3. le curve *S-N* sperimentali sono state confrontate con quelle riportate nelle normative dell'*IIIW* e dell'*Eurocodice 9*, dimostrando come queste ultime sono molto conservative;
4. il Metodo Termografico ha permesso di valutare velocemente e con successo la resistenza a fatica di giunti saldati in lega di alluminio.

#### RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare i "Cantieri Navali Rodriguez" per aver fornito i giunti saldati utilizzati per le prove sperimentali.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] International Institute of Welding. Fatigue design of welded joints and components. Abington Publishing, Abington, Cambridge, 1996.
- [2] Eurocodice 3. Design of steel structures, part 1-1: General and rules for building. European Committee for Standardisation. Brussels, 1998 ENV, 1999-2.
- [3] Eurocodice 9. Design of aluminium structures, part 2: structures susceptible to fatigue. European Committee for Standardisation. Brussels, 1998 ENV, 1999-2.
- [4] Chiofalo G., Crupi V., Guglielmino E., Scibilia L. Critical analysis of current codes on fatigue design of welded joints. ICMRT07, 2<sup>th</sup> International Conference on Marine Research and Transportation, Ischia (NA), 28-30 June 2007.
- [5] Crupi G., Crupi V., Guglielmino E., Taylor D. Fatigue assessment of welded joints using critical distance and other methods. Engineering Failure Analysis. 2005; 12 (1): 129-142.
- [6] La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for the rapid determination of fatigue limit of materials and mechanical components. International Journal of Fatigue. 2000; 22: 65-73.
- [7] Fargione G., Geraci A., La Rosa G., Risitano A. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method. International Journal of Fatigue. 2002; 24: 11-19.
- [8] Crupi V., Guglielmino E., Risitano A., Taylor D. Different methods for fatigue assessment of T welded joints used in ship structures. Journal of Ship Research. 2007; 51(2).
- [9] Biot M., Crupi V., Marinò A., Risitano G. Thermographic Method for Fatigue Prediction of Friction Stir Welded Light Alloy Panels in Shipbuilding. HSMV 2005, 7<sup>th</sup> Symposium on high speed marine vehicles, Napoli (NA), 21-23 September 2005: 81-88.
- [10] Crupi V., Guglielmino E., Maestro M., Marinò A. Determinazione rapida della resistenza a fatica di giunti saldati in acciaio utilizzati in campo navale. Il Convegno SEA-MED, Messina (ME), 21 July 2006.
- [11] Crupi V., Guglielmino E., Labanti M., Merenda S. Comportamento meccanico di superleghe di nickel in presenza di intaglio. IGF18, XVIII Convegno Nazionale IGF, Cetraro (CS), 31 May – 1 June 2006.
- [12] Crupi V., La Rocca S. Valutazione del J integral mediante analisi termografico. XXXI Convegno AIAS, Parma 18-21 September 2002, paper awarded by "Premio Capocaccia 2003".
- [13] Audenino A.L., Crupi V., Zanetti E.M. Correlation between thermography and internal damping in metals. International Journal of Fatigue. 2003; 25/4: 343-351.
- [14] Audenino A.L., Crupi V., Zanetti E.M. Thermoelastic and elastoplastic effects measured by means of a standard thermocamera. Experimental Techniques. 2004; 28 (2): 23 – 28.