



Evaluation of the highly stressed volume by numerical and experimental approaches

Valutazione del Volume Critico mediante analisi numeriche e sperimentali

V. Crupi, E. Guglielmino, L. Musumeci

*Università degli Studi di Messina, Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria dei Materiali,
viale F. Stagno D'Alcontres 31, 98166, Messina*

ABSTRACT. In this research activity static tensile and fatigue tests have been carried out to investigate the mechanical behavior of specimens made of high strength steel AH36, widely used in shipbuilding. It was also analysed the effect of stress concentration due to the presence of circular holes with diameters from 5 to 10 mm. The digital image correlation technique was applied to detect the displacement pattern during the static tests. The versatility of this method makes it possible to evaluate some of the phenomena of damage and local heterogeneities which could be hardly observed. The DIC (Digital Image Correlation) technique, applied on the specimens with a passing hole of different diameter, enabled us to analyze the displacements around the hole. The displacement field was compared with that obtained from finite element analyses and with the temperature pattern detected by the thermographic technique. The highly stressed volume, defined as the material volume subjected to at least 95% of the maximum stress value, was evaluated by theoretical and numerical analysis. Then fatigue tests were conducted on the different types of investigated specimens to evaluate the fatigue strength reduction for the presence of passing holes and correlate it with the corresponding values of highly stressed volume.

SOMMARIO. Nel presente lavoro di ricerca sono state effettuate prove di trazione statica e prove di fatica per investigare il comportamento meccanico di provini realizzati in acciaio ad elevata resistenza AH36, largamente adoperato nelle costruzioni navali. E' stato studiato anche l'effetto di concentrazione delle tensioni dovuto alla presenza di fori passanti circolari con diametro da 5 e 10 mm. La tecnica di correlazione delle immagini digitali è stata applicata per valutare l'andamento degli spostamenti durante le prove statiche. La versatilità di tale metodo rende possibile la valutazione di alcuni fenomeni di danneggiamento ed eterogeneità locali che difficilmente potrebbero essere osservati. La tecnica DIC (*Digital Image Correlation*), applicata sui provini con foro passante di diverso diametro, ha permesso di analizzare l'incremento delle deformazioni in prossimità del foro. L'andamento degli spostamenti è stato confrontato con quello ottenuto da simulazioni numeriche agli elementi finiti e con l'andamento delle temperature rilevate mediante la tecnica termografica. L'analisi teorica e numerica ha permesso, inoltre, di valutare in corrispondenza del foro il *Volume Critico*, definito come il volume di materiale sottoposto ad almeno il 95 % del valore della massima tensione agente. Successivamente sono state condotte prove di fatica sulle diverse tipologie di provini investigate per valutare la riduzione di resistenza a fatica per la presenza dei fori passanti e correlarla con i corrispondenti valori di *Volume Critico*.

KEYWORDS. Highly stressed volume; Fatigue strength; Size effect; Stress concentration; Digital image correlation; thermography.



INTRODUZIONE

La stima della resistenza a fatica mediante prove di laboratorio è praticamente di limitato uso pratico se i risultati ottenuti non possono essere estesi con un certo grado di affidabilità dal provino alla struttura o al componente meccanico reale. In letteratura sono presenti numerosi approcci teorico-sperimentali che permettono di prevedere come varieranno le caratteristiche meccaniche ottenute da prove di laboratorio.

Al fine di trovare una relazione sufficientemente generale e relativamente accurata che tenga conto dei diversi fattori (l'effetto di concentrazione delle tensioni, l'effetto scala, il tipo di sollecitazione, la geometria reale) che influenzano la resistenza a fatica, *Kuguel* [1] introdusse il concetto di *highly stressed volume* per poter procedere direttamente con la progettazione ingegneristica partendo dai dati sperimentali.

Il collasso o la rottura per fatica di un provino o, per estensione, di un componente meccanico è un fenomeno meramente statistico; il collasso è associato principalmente alle imperfezioni ed ai difetti presenti nel pezzo, dunque la probabilità di trovare un difetto da cui possa propagarsi una cricca è proporzionale al volume del pezzo stesso. Tale argomentazione sta alla base del concetto di *highly stressed volume* affermando che, con un certo margine statistico, due provini hanno la stessa probabilità di collasso se entrambi hanno lo stesso *highly stressed volume* di materiale. Questo concetto può essere esteso ad un componente meccanico mediante la valutazione dell'effetto scala, che tiene conto della variazione della resistenza a fatica all'aumentare delle dimensioni. L'approccio, basato sulla definizione di *highly stressed volume*, è stato applicato per valutare la resistenza a fatica di: giunti saldati in lega di alluminio con differenti spessori e zone di concentrazione delle tensioni [2], provini intagliati in acciaio sottoposti a differenti condizioni di carico [3] e trattamenti termici [4], provini e componenti in materiale composito a fibre corte [5].

Nella presente trattazione è stato definito il *Volume Critico* come la porzione di materiale soggetta ad una tensione pari ad almeno il 95% della tensione massima agente ed è stato correlato con la riduzione della resistenza a fatica dovuta alla presenza di fori passanti circolari.

MATERIALI E METODI

Le prove sperimentali sono state condotte su provini (Fig. 1) ricavati da lamiere di acciaio *AH36* di spessore nominale pari a 5 mm. Tale tipologia di acciaio è largamente utilizzata nelle costruzioni navali.

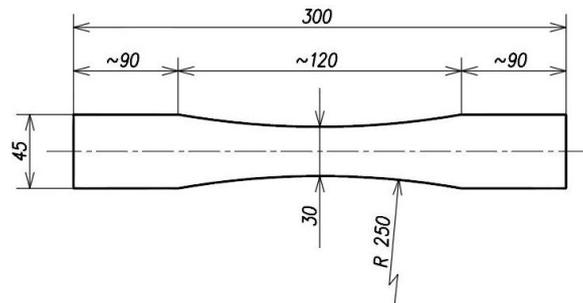


Figura 1: Geometria dei provini.

La composizione chimica dell'acciaio è riportata in Tab. 1 insieme ai valori di concentrazione minima e massima dei diversi costituenti così come richiesto dai regolamenti di classifica navali per l'acciaio *AH36*.

Sono state analizzate tre tipologie di provini: provini senza foro e con foro passante di forma circolare con diametro da 5 e 10 mm, rispettivamente indicati con le sigle *BM*, *H5* e *H10*.

	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	V	Nb	Ti	N	C _{EQ}
min	0.16	1.43	0.27	0.012	0.009	0.04	0.02	0.02	0	0.044	0	0	0	0.005	0.406
max	0.18	1.60	0.5	0.035	0.035	0.35	0.4	0.2	0.08		0.1	0.04	0.02		

Tabella 1: Composizione chimica (%) dell'acciaio utilizzato per i provini.

Le prove effettuate per la caratterizzazione di tale materiale sono state principalmente di due tipi: prove statiche di trazione e prove di fatica. Le sperimentazioni sono state condotte con la macchina di prova servoidraulica *MTS 810 System* con cella di carico da 250 kN.

La tecnica di correlazione delle immagini digitali è stata applicata per rilevare l'andamento degli spostamenti durante le prove statiche. Tale tecnica è un metodo ottico che consente di determinare spostamenti e deformazioni a campo intero mediante il confronto di immagini digitali. Tale confronto tra le immagini digitali è possibile grazie ad un trattamento sulla superficie del provino che permette la sua suddivisione in una serie di zone discrete (*facet*) di cui è possibile seguire l'evoluzione nel tempo. Il trattamento consiste nel verniciare il provino con una base di bianco antiriflesso e nello spruzzare uno spray nero su tale base (Fig. 2). In questo modo si crea sulla superficie da esaminare una mappa di punti disposti in maniera casuale (*speckle*) che permette di ricreare digitalmente una griglia base da cui poter misurare gli spostamenti (Fig. 3).



Figura 2: Provino con superficie *speckle*.

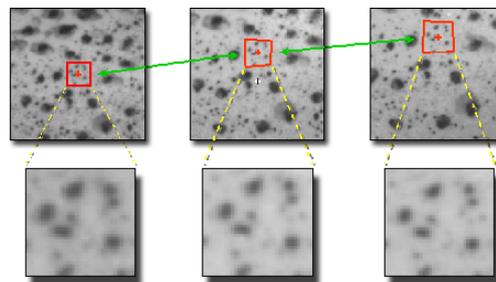


Figura 3: Confronto tra immagini ad istanti diversi.

È stato utilizzato il sistema di analisi delle immagini *ARAMIS 3D 2M LT* con 2 fotocamere da 1600 x 1200 *pixel*. L'accuratezza minima nella misura delle deformazioni di tale sistema è pari a 10^{-4} mentre la frequenza massima di acquisizione è pari a 12 Hz.

La procedura tradizionale per la valutazione della resistenza a fatica richiede un numero elevato di prove sperimentali. Per superare queste difficoltà, è stato utilizzato il *Metodo Termografico Rapido* [6], basato sulla termografia ad infrarossi, per la valutazione rapida della resistenza a fatica dell'acciaio *AH36* in assenza (*BM*) ed in presenza di fori passanti (*H5* e *H10*). Questo metodo consente di valutare rapidamente la resistenza a fatica di materiali, strutture e componenti mediante un numero limitato di prove sperimentali [6] ed è stato, in particolare, già applicato con successo per valutare la resistenza a fatica di giunti saldati in acciaio *AH36* [7] ed in lega leggera di alluminio utilizzati nelle strutture navali [8].

Per rilevare l'andamento della temperatura superficiale del provino durante le prove di fatica, è stata acquisita una immagine ogni 25 s da uno scanner termico (modello *A40M* della *Flir System*) La termocamera, che ha una risoluzione termica inferiore a 0.08 °C, è stata posizionata ad una distanza di circa 0.4 m. Le immagini termografiche, che hanno una risoluzione di 320 x 240 *pixel*, sono state analizzate mediante il software *ThermaCAM Researcher*.

I valori di limite di fatica per le diverse tipologie di provini investigati (*BM*, *H5* e *H10*) sono stati correlati con i corrispondenti valori di *Volume Critico*, determinati mediante approcci teorici e modelli numerici agli elementi finiti, che sono stati validati confrontando l'andamento degli spostamenti con quello ottenuto applicando la tecnica *DIC*.

PROVE STATICHE

Prove svolte preliminarmente hanno permesso di trovare la *set-up* di prova ottimale e di validare l'attendibilità dei risultati forniti dalla tecnica *DIC*. In particolare, per verificare l'attendibilità degli spostamenti rilevati dalla strumentazione *ARAMIS*, sono state condotte prove di controllo mediante l'utilizzo di un estensometro (Fig. 4). In Fig. 5 è riportata la curva tensione – deformazione calcolata mediante estensometro e mediante tecnica *DIC*.

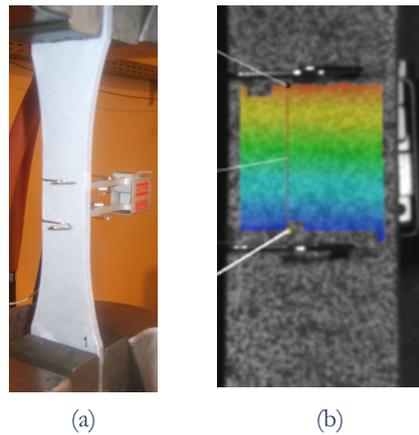


Figura 4: Provino con estensometro (a), immagine digitale (b).

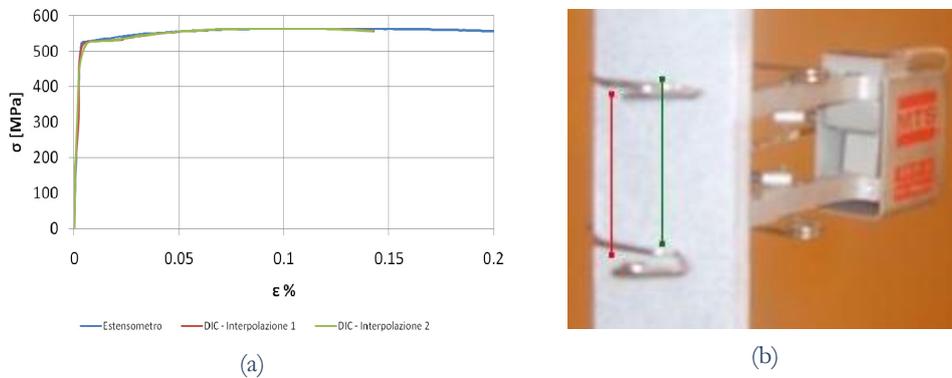


Figura 5: Confronto tra le curve σ - ϵ (a), linee base di interpolazione (b).

Le prove statiche sono state condotte applicando una velocità di spostamento della traversa pari a 3 mm al minuto. Dalle prove sperimentali è stato dunque possibile calcolare la curva tensione – deformazione dell'acciaio AH36, che è stata utilizzata per definire le proprietà del materiale nel modello numerico FEM, realizzato mediante il software MENTAT. La tecnica DIC ha permesso, inoltre, di valutare l'andamento delle deformazioni durante le prove statiche in prossimità del foro (figure 6 e 7).

In alcune prove statiche sono state applicate sia la tecnica DIC sia quella termografica (Fig. 8) ed i provini sono stati opportunamente preparati creando una superficie *speckle* sul lato rivolto alla strumentazione DIC e una superficie con vernice acrilica nera opaca sul lato rivolto alla termocamera.

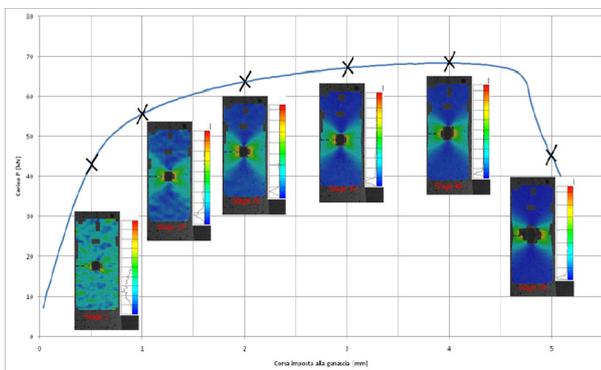


Figura 6: Curva carico – corsa per un provino H5.

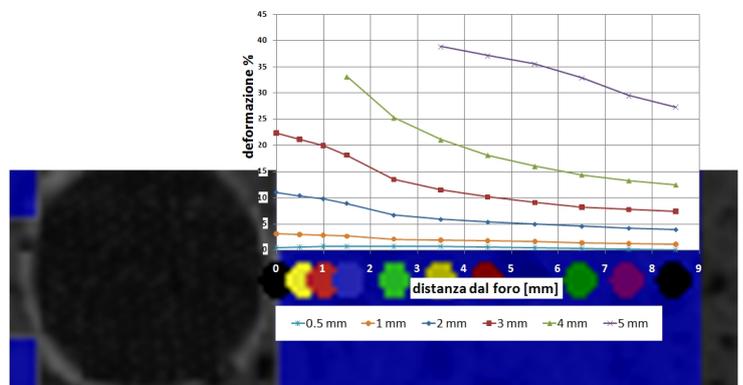


Figura 7: Andamento delle deformazioni al variare del carico applicato.

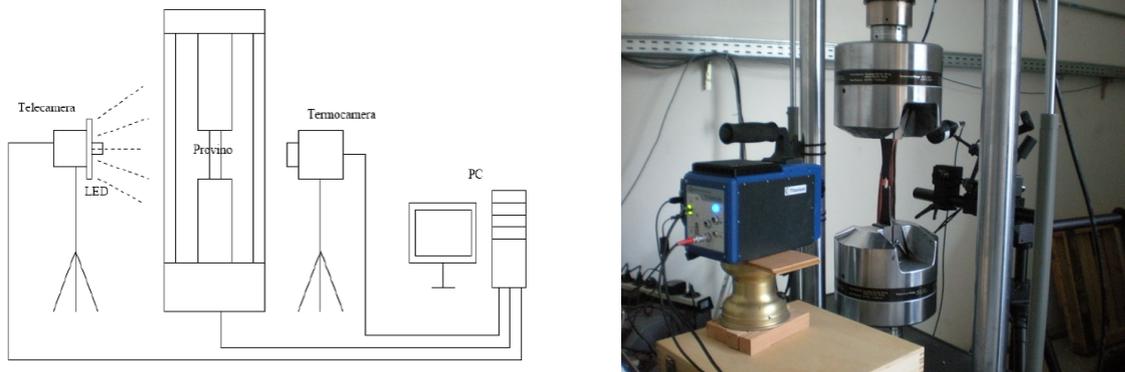


Figura 8: *set-up* sperimentale.

L'impiego delle due tecniche ha permesso di fare un confronto qualitativo tra le due tecniche. La Fig. 9 mostra le immagini *DIC* e le corrispondenti immagini termografiche riferite allo stesso provino per valori di spostamento della traversa pari a 1, 3 e 5 mm. E' possibile notare che la zona di concentrazione delle deformazioni presenta un andamento simile a quello della zona termicamente alterata con il tipico andamento a farfalla.

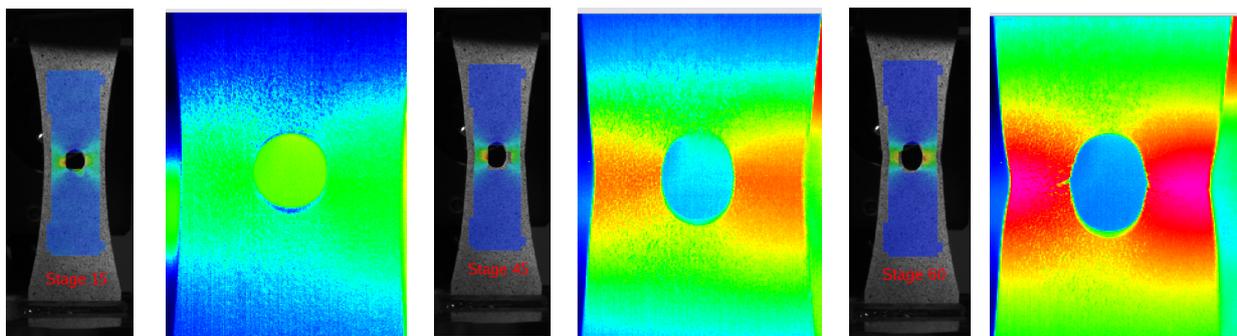


Figura 9: Confronto tra immagini *DIC* e termogrammi.

PROVE DI FATICA

Calcolo teorico e numerico del Volume Critico

La superficie, dove si formano generalmente le cricche di fatica, ha una grande influenza sulla resistenza del materiale e, per un dato metallo, essa può essere definita conoscendone le seguenti variabili: l'ambiente di lavoro, la rugosità, le tensioni residue, il gradiente delle tensioni. In particolare *Kuguel* [1] ipotizzò che i primi tre fattori siano delle costanti mentre l'ultima variabile sia data dalla seguente relazione:

$$G = \frac{d\sigma}{dx} \cdot \frac{1}{\sigma_{MAX}} \quad (1)$$

Utilizzando i dati presenti in letteratura *Kuguel* [1] determinò il *Volume Critico* (Fig. 10) conoscendo il gradiente delle tensioni, e considerando le seguenti ipotesi semplificative:

1. l'area A è considerata triangolare come mostrato in Fig. 11;
2. la distanza d^l tra i centroidi delle aree reali A e delle loro aree equivalenti triangolari è approssimata al diametro d come mostrato in Fig. 11;
3. il *Volume Critico* V_C è soggetto ad un puro momento flettente;
4. il fattore di concentrazione delle tensioni K_t non si modifica in grandezza per i punti della superficie tra d e d_l .

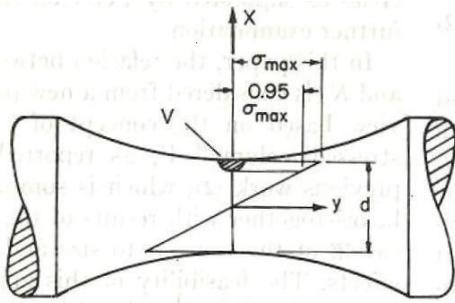


Figura 10: *Volume Critico* per un provino.

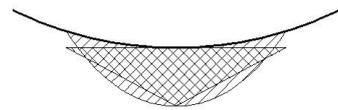


Figura 11: Area del *Volume Critico* e sua approssimazione triangolare.

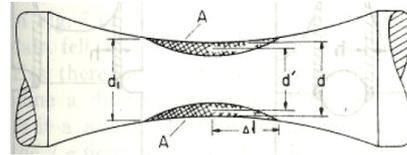


Figura 12: *Volume Critico* di un provino sottoposto a momento flettente.

Dall'analisi dei risultati sperimentali si evince che la relazione che intercorre tra il logaritmo della resistenza a fatica di un materiale metallico e il suo *Volume Critico* è strettamente lineare e può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$\sigma_{MAX} = B \cdot V_C^{-a} \quad (2)$$

Per calcolare il *Volume Critico* mediante calcolo teorico è necessario conoscere lo stato tensionale del provino. Nel caso dei provini senza foro *BM* sottoposti ad una sollecitazione di trazione si può ipotizzare un andamento lineare delle tensioni che dipende esclusivamente dalla sezione resistente (Fig. 13). La tensione massima è pari a:

$$\sigma_{MAX} = \frac{F}{2 \cdot w \cdot t} \quad (3)$$

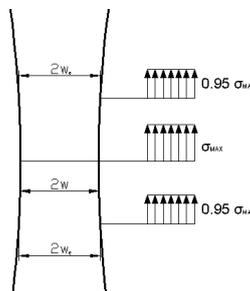


Figura 13: Andamento delle tensioni nel provino *BM*

Il valore di tensione pari al 95% della tensione massima si ottiene dunque in corrispondenza della semilarghezza w_e pari a:

$$w_e = \frac{1}{0.95} \cdot w \quad (4)$$

Definito il raggio di curvatura del provino r_s , la semialtezza Δl del *Volume Critico* è pari a:

$$\Delta l \cong \sqrt{r_s \cdot 2 \cdot (w_e - w)} = \sqrt{r_s \cdot 2 \cdot \left[w \left(\frac{1}{0.95} - 1 \right) \right]} \quad (5)$$

Nel caso di provino non intagliato il volume critico è pari a:

$$V_C = 2 \cdot (w_e + w) \cdot \Delta l \cdot t \cong 1.332 \cdot w \cdot t \cdot \sqrt{r_s \cdot w} \quad (6)$$



Nel caso della presenza di una zona di concentrazione delle tensioni lo stato tensionale varia notevolmente in funzione del tipo e della forma dell'intaglio o della discontinuità geometrica.

Per provini con fori circolari passanti si utilizza l'espressione (7) fornita da Howland e Schulz [9] che fornisce il valore di σ_y adimensionalizzato rispetto alla tensione S che si avrebbe per un provino integro e di spessore unitario ($S = F/w$):

$$\frac{\sigma_y}{S} = A + B \cdot \left(\frac{r_i}{x}\right)^2 + C \cdot \left(\frac{r_i}{x}\right)^4 \quad (7)$$

dove r_i è il raggio del foro e A, B, C sono coefficienti ottenuti sperimentalmente e riportati in Tab. 2.

	r_i/w				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
A	1.001	1.044	0.968	1.108	1.003
B	0.544	0.454	0.835	0.494	0.694
C	1.485	1.642	1.558	2.138	2.623

Tabella 2: Valori sperimentali di A, B, C al variare del rapporto r_i/w .

I valori di A, B e C per i valori dei rapporti di r_i/w non tabulati sono stati ricavati mediante interpolazione lineare. In Fig. 14 sono mostrati gli andamenti dei rapporti di σ_y/S al variare dell'ascissa x/w e del rapporto r_i/w .

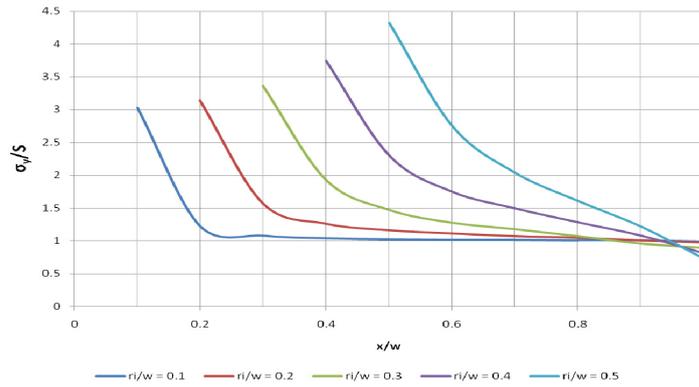


Figura 14: andamenti dei rapporti di σ_y/S al variare dell'ascissa x/w e del rapporto r_i/w .

Secondo tale notazione la tensione nominale è pari a:

$$\frac{\sigma_n}{S} = \frac{w}{w - r_i} \quad (8)$$

e di conseguenza il fattore di concentrazione delle tensioni K_t è pari a:

$$K_t = \frac{\sigma_{MAX}}{\sigma_n} = \frac{(A + B + C) \cdot (w - r_i)}{w} \quad (9)$$

La larghezza b (Fig. 15) del *Volume Critico* si ottiene facilmente risolvendo la seguente relazione:

$$A + B \cdot \left(\frac{r_i}{h + r_i}\right)^2 + C \cdot \left(\frac{r_i}{h + r_i}\right)^4 = 0.95 \cdot \frac{\sigma_{MAX}}{S} \quad (10)$$

L'andamento della tensione tangenziale lungo la circonferenza del foro al variare dell'angolo η (Fig. 16) è dato da:

$$\frac{\sigma_\eta}{S} = A_\eta + B_\eta \cdot \cos \eta + C_\eta \cdot \cos^2 \eta \quad (11)$$



dove A_η , B_η , C_η sono coefficienti ottenuti sperimentalmente e riportati in Tab. 3.

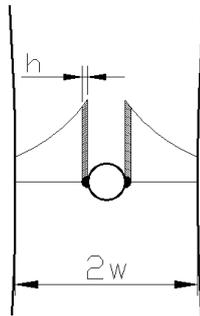


Figura 15: *Volume Critico* per provino con foro circolare.

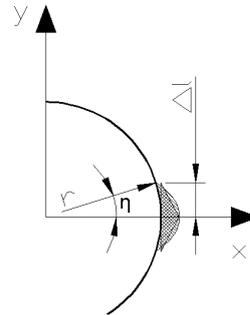


Figura 16: Particolare del *Volume Critico*.

	r_i/w					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
A_η	-0.478	3.197	-0.302	-0.009	3.060	12.628
B_η	-1.124	-9.150	-1.806	-3.169	-11.378	-35.139
C_η	4.602	8.984	5.248	6.538	12.057	26.831

Tabella 3: Valori sperimentalmente di A_η , B_η , C_η al variare del rapporto r_i/w .

I valori di A_η , B_η e C_η per i valori dei rapporti di r_i/w non tabulati sono stati ricavati mediante interpolazione lineare. Il valore di tensione σ_y/S pari al 95% della tensione massima σ_{yMAX}/S si ha in corrispondenza di un determinato angolo η_e ed è legato al valore di σ_η/S dalla seguente relazione:

$$\frac{\sigma_y}{S} = \frac{\sigma_\eta}{S} \cdot \cos \eta_e \quad (12)$$

Il valore dell'angolo η_e si ottiene risolvendo l'equazione:

$$A_\eta + B_\eta \cdot \cos \eta_e + C_\eta \cdot \cos^2 \eta_e = 0.95 \cdot \frac{\sigma_{MAX(\eta=0)}}{S \cdot \cos \eta_e} \quad (13)$$

Determinato η_e si può procedere al calcolo della semialtezza Δl del *Volume Critico* (Fig. 16):

$$\Delta l = r_i \cdot \sin \eta_e \quad (14)$$

Il *Volume Critico* nel caso di provino con foro circolare è quindi ottenuto dalla seguente relazione:

$$V_c = 2 \cdot \Delta l \cdot h \cdot t = 2 \cdot r_i \cdot h \cdot t \cdot \sin \eta_e \quad (15)$$

Il *Volume Critico* è stato valutato anche mediante analisi numeriche agli elementi finiti come mostrato dalla Fig. 17. I valori teorici di K_t , ottenuti mediante l'eq. (9), e del volume critico V_C , ottenuti dall'eq. (16), sono riportati per le diverse tipologie di provini investigate (BM, H5, H10) in Tab. 4 con i corrispondenti valori ricavati dall'analisi numerica.

	K_t			V_C [mm ³]	
	H5	H10	BM	H5	H10
Analisi teorica	2.58	2.32	6118	0.23	0.85
Analisi numerica	2.62	2.30	6294	0.31	0.98

Tabella 4: Valori del volume critico.

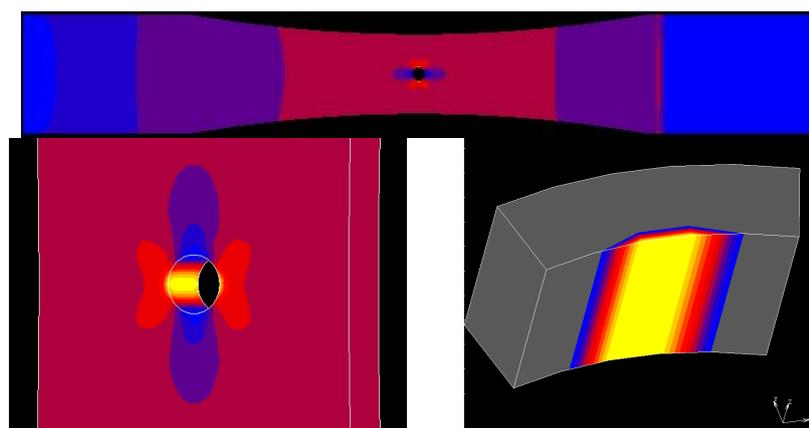


Figura 17: Calcolo del *Volume Critico* mediante analisi FEM.

Determinazione del limite di fatica mediante Metodo Termografico Rapido

Le prove di fatica sono state condotte applicando carichi ciclici con rapporto di sollecitazione $R = 0.5$ ed alla frequenza di 20 Hz. Le indagini sperimentali sono state condotte ricorrendo ad una termocamera ad infrarossi che, per tutta la durata della prova di fatica, ha rilevato con continuità la variazione della temperatura superficiale dei provini. L'analisi delle immagini termografiche consente di applicare il *Metodo Termografico*, che definisce il limite di fatica come il massimo valore di tensione per il quale è nullo l'incremento termico su tutta la superficie di un provino ciclicamente sollecitato.

In particolare il *Metodo Termografico Rapido (MTR)* permette di definire il limite di fatica utilizzando “teoricamente” un solo provino. Questo metodo [6] consiste nell'applicare sul provino una successione di carichi ciclici di ampiezza crescente per un determinato numero di cicli, senza variare la frequenza. Dalle prove sperimentali eseguite in passato [6 - 8] è stato constatato che la temperatura di stabilizzazione termica ΔT_{AS} è raggiunta dopo pochi cicli rispetto alla vita a fatica totale; perciò è possibile considerare l'incremento termico ottenuto in un singolo *step* di carico come il valore asintotico ΔT_{AS} relativo all'ampiezza di tensione applicata $\Delta\sigma$. Al fine di applicare il *Metodo Termografico Rapido*, sono state condotte, per ogni tipologia di provino (*BM*, *H5* e *H10*), prove di fatica con valori di *range* di tensione crescenti a partire da un valore iniziale (pari a 180 MPa per i provini *BM* e 140 MPa per i provini *H5* e *H10*) fino alla rottura, aumentando la tensione di 20 MPa ogni 30000 cicli. In accordo con il *Metodo Termografico Rapido*, i valori asintotici degli incrementi termici ΔT_{AS} sono stati dapprima diagrammati in funzione del quadrato della variazione di tensione applicata $\Delta\sigma^2$ e poi è stata fatta una regressione lineare. Il limite di fatica $\Delta\sigma_{ETM}$ può quindi determinarsi dalla curva che interpola linearmente i dati $\Delta T_{AS} - \Delta\sigma^2$ come il massimo valore di tensione $\Delta\sigma_{ETM}$ per il quale si ha $\Delta T_{AS} = 0$. L'applicazione della procedura descritta sopra ha permesso di ottenere una e previsioni del limite di fatica $\Delta\sigma_{ETM}$ pari a 164 MPa per i provini *BM* ed un coefficiente di riduzione della resistenza a fatica K_f pari a 1.06 per i provini *H5* e pari 1.28 per i provini *H10*.

Correlazione tra resistenza a fatica e Volume Critico

I valori del coefficiente K_f , dovuti alla riduzione della resistenza a fatica per la presenza di fori passanti di diverso diametro, possono essere calcolati mediante le formulazioni presenti in letteratura [10], che definiscono K_f in relazione con K_t mediante l'indice q di sensibilità all'intaglio:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (16)$$

Il valore di q può essere stimato mediante le ben note equazioni del *Peterson* [11]:

$$q = \frac{1}{1 + \frac{c_p}{r_i}} \quad (17)$$

e del *Neuber* [12]:



$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{c_N}{r_i}}} \quad (18)$$

dove c_P e c_N sono costanti del materiale e possono essere espresse in funzione della tensione di rottura mediante le seguenti relazioni [13]:

$$c_P = 1000 \cdot \left(\frac{270}{\sigma_R} \right)^{1.8} \quad (19)$$

$$\log \frac{c_N}{1000} = -\frac{\sigma_R - 134}{586} \quad (20)$$

I valori di K_f ottenuti applicando l'approccio teorico, descritto sopra, e quello sperimentale (MTR) sono riportati in Tab. 5.

	K_t (FEM)	K_f (Peterson)	K_f (Neuber)	K_f (MTR)
H5	2.62	1.014	1.164	1.06
H10	2.30	1.023	1.179	1.28

Tabella 5: Confronto tra i valori di K_f ottenuti mediante approccio teorico e sperimentale.

Successivamente la riduzione della resistenza a fatica dovuta alla presenza di fori passanti circolari è stata correlata con i corrispondenti valori del *Volume Critico* mediante la seguente relazione [1]:

$$K_t \Delta \sigma_{0n} = B \cdot V_c^{-\alpha} \quad (21)$$

In Fig. 18 sono riportati in un diagramma doppio-logaritmico i valori della tensione equivalente ($K_t \Delta \sigma_{0n}$), calcolati utilizzando i tre approcci precedenti (equazione del *Peterson*, equazione del *Neuber*, *MTR*), in funzione dei corrispondenti valori del *Volume Critico* e dall'interpolazione lineare dei dati è stato ottenuto un valore dell'esponente dell'Eq.(21) pari a circa 0.08.

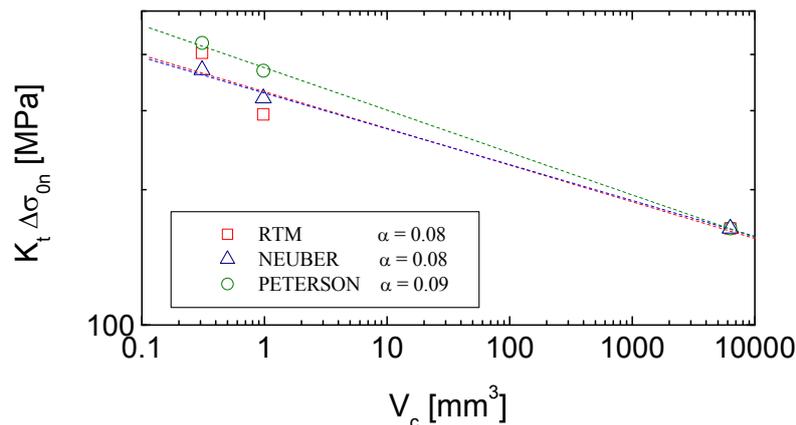


Figura 18: Correlazione tra tensione equivalente e *Volume Critico*.

CONCLUSIONI

Il comportamento meccanico di un acciaio ad elevata resistenza *AH36*, largamente adoperato nelle costruzioni navali, è stato investigato considerando anche l'effetto di concentrazione delle tensioni dovuto alla presenza di fori passanti circolari di diverso diametro. La tecnica *DIC*, applicata durante le prove statiche, ha permesso di analizzare in



prossimità del foro l'andamento delle deformazioni, che è stato confrontato con l'andamento delle temperature rilevate mediante la tecnica termografica. L'analisi teorica e numerica ha permesso, inoltre, di valutare il *Volume Critico* sia nei provini con foro sia in quelli senza foro. Successivamente sono state condotte prove di fatica per valutare, mediante l'applicazione del *Metodo Termografico Rapido*, la riduzione di resistenza a fatica per la presenza dei fori e correlarla con i corrispondenti valori di *Volume Critico*. Sviluppi futuri dell'attività di ricerca saranno volti ad estendere i risultati ottenuti mediante prove di laboratorio su provini a componenti strutturali reali per stimarne la vita a fatica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Kuguel, ASTM Proc., 61 (1961) 732.
- [2] C.M. Sonsino, D. Radaj, U. Brandt, H.P. Lehrke, Int. J. Fatigue, 21 (1999) 985.
- [3] H-P Gaesner, Computational Materials Science, 44 (2008) 230.
- [4] C-K Lin, W-J Lee, Int. J. Fatigue, 20 (1998) 301.
- [5] C.M. Sonsino, E. Moosbrugger, Int. J. Fatigue, 30 (2008) 1279.
- [6] G. La Rosa, A. Risitano, Int. J. Fatigue, 22 (2000) 65.
- [7] V. Crupi, E. Guglielmino, A. Risitano, D. Taylor, Journal of Ship Research, 51 (2007) 150.
- [8] V. Crupi, E. Guglielmino, M. Maestro, A. Marinò, Mar. Struct., 22 (2009) 373.
- [9] R.C.J. Howland, Philosophical Transactions of the Royal Society (London), 229 (1930) 49.
- [10] M. Ciavarella, G. Meneghetti, Int. J. Fatigue, 26 (2004) 289.
- [11] R.E. Peterson, Notch sensitivity, In: Sines G, Waisman JL, editors. Metal fatigue. New York: MacGraw-Hill, (1959) 293.
- [12] H. Neuber, Kerbspannungslehre, Vienna: Springer-Verlag (1987). [Reprinted in translation as Theory of notch stresses. Berlin: Springer Publishers (1958)].
- [13] N.E. Dowling, In: Mechanical behavior of materials. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc (1998).

NOMENCLATURA

b	metà larghezza del <i>Volume Critico</i> per provino intagliato [mm]
q	indice di sensibilità all'intaglio
r_s	raggio di curvatura del provino [mm]
r_i	raggio di curvatura dell'intaglio [mm]
t	spessore del provino [mm]
w	semilarghezza del provino [mm]
w_e	semilarghezza del provino in corrispondenza del 95% della tensione massima [mm]
G	gradiente delle tensioni [1/mm]
K_t	coefficiente teorico di concentrazione delle tensioni in campo elastico
K_f	coefficiente di riduzione della resistenza a fatica
R	rapporto di sollecitazione
V_C	Volume Critico [mm ³]
η_e	angolo di semiapertura del <i>Volume Critico</i> per provini intagliati [rad]
σ_{MAX}	tensione massima [MPa]
σ_n	tensione nominale [MPa]
Δl	semialtezza del <i>Volume Critico</i> [mm]
$\Delta\sigma$	range delle tensioni [MPa]
$\Delta\sigma_{0n}$	limite di fatica in presenza di intaglio [MPa]
$\Delta\sigma_{eTM}$	limite di fatica ottenuto con il <i>Metodo Termografico Rapido</i> [MPa]
ΔT	incremento di temperatura [°C]
ΔT_{AS}	incremento asintotico di temperatura [°C]