

Analisi del comportamento a fatica a due livelli di carico di un acciaio inossidabile basata sulla dissipazione di energia

B. Atzori, G. Meneghetti, M. Ricotta

Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, via Venezia, 1 – 35131 Padova

RIASSUNTO. In questo lavoro è stato analizzato il comportamento a fatica di un acciaio inossidabile AISI 304L. Nella prima parte del lavoro sono presentati i risultati ottenuti da prove ad ampiezza di sollecitazione costante sintetizzati sia in ampiezza di tensione sia in termini di densità di energia dissipata dal materiale per ciclo, Q . Successivamente alcuni provini sono stati sollecitati ad un livello di carico superiore al limite di fatica per circa il 70% della presunta vita e poi ad un livello di tensione inferiore al limite di fatica ad ampiezza costante precedentemente determinato. Infine è stata confrontata l'energia dissipata nella seconda parte della prova con quella trovata in una prova ad ampiezza costante, allo stesso livello di tensione.

PAROLE CHIAVE. Fatica; Energia dissipata; Termografia.

INTRODUZIONE

Nell'ambito dei metodi termometrici per l'analisi del comportamento a fatica dei materiali metallici, recentemente [1] è stato proposto di utilizzare l'energia dissipata per unità di volume di materiale (densità di energia) e per ciclo, Q , quale indice correlato al danneggiamento a fatica, da cui la distribuzione di temperatura sulla superficie del materiale dipende. Tipicamente la temperatura superficiale viene misurata con termocamere a raggi infrarossi oppure con termocoppie. In precedenti lavori [1,3,4] è stato analizzato il comportamento a fatica del materiale in prove ad ampiezza di tensione costante, mostrando come un'unica banda di dispersione in termini di parametro energetico Q possa sintetizzare i risultati di prove ottenuti su provini lisci e intagliati in acciaio AISI 304L per un prefissato rapporto nominale di ciclo R , definito come rapporto tra la tensione nominale minima e quella massima applicate. Viceversa non è mai stata analizzata in letteratura, per quanto a conoscenza degli Autori, la risposta del materiale in termini di energia in prove ad ampiezza variabile. Pertanto in questo lavoro sono state eseguite semplici prove a due livelli di carico dei quali il primo superiore e il secondo inferiore al limite di fatica ad ampiezza costante, per verificare se e in quale misura il parametro Q sia sensibile al danneggiamento subito dal materiale al primo livello di carico.

MODELLO TEORICO

Il modello teorico alla base della tecnica usata durante le prove sperimentali per la stima dell'energia specifica dissipata dal materiale per ciclo Q è stato proposto in [1] ed è sinteticamente riassunto nel seguito. Consideriamo un volume di controllo dV di materiale sollecitato a fatica rappresentato in Fig. 1.

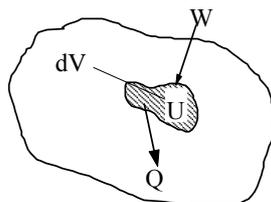


Figura 1: Bilancio energetico di un materiale sollecitato a fatica.



L'equazione di bilancio energetico applicata al volume consente di scrivere:

$$W \cdot dV = (H_{cd} + H_{cv} + H_{ir}) \cdot dV + \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) \cdot dV \quad (1)$$

in cui W rappresenta la potenza meccanica fornita per unità di volume; i termini H rappresentano la potenza termica dissipata per unità di volume rispettivamente per conduzione, convezione e irraggiamento; l'ultimo termine a secondo membro rappresenta la rapidità di variazione dell'energia interna. Quest'ultima è associata alla capacità termica del materiale con densità ρ , calore specifico c soggetto alla temperatura variabile nel tempo $T(t)$ e all'energia E_p assorbita dal materiale per scorrimenti plastici, che corrisponde alla quota parte della totale energia fornita che effettivamente danneggia il materiale [2].

Tipicamente la temperatura superficiale T sale rapidamente nella fase iniziale di una prova di fatica e successivamente si stabilizza ad un valore T_{stab} tanto più elevato quanto maggiore è l'ampiezza di tensione applicata [3,4]. Quando la temperatura del materiale ha raggiunto la stabilizzazione nel corso della prova, la potenza termica totale dissipata si può pensare uguale ad un'equivalente potenza termica interna H generata dal materiale:

$$H = H_{cd} + H_{cv} + H_{ir} \quad (2)$$

Precedentemente [4] il termine H era stato calcolato stimando separatamente i contributi dovuti ai tre modi di scambio termico. Considerando invece una brusca interruzione della prova a fatica, i termini W ed E_p nell'Eq. 1 si annullano e perciò è possibile scrivere:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -(H_{cd} + H_{cv} + H_{ir}) \quad (3)$$

in cui ρ è la massa volumica e c il calore specifico. Noti quindi ρ e c è possibile stimare il parametro H dalla misura del gradiente di raffreddamento e quindi l'energia specifica Q dissipata dal materiale per unità di volume e per ciclo mediante la relazione:

$$Q = \frac{H}{f} \quad (4)$$

essendo f la frequenza della prova a fatica. Il parametro Q , in accordo a quanto proposto in [1,5], è stato assunto come un indice del danneggiamento a fatica più promettente rispetto alla temperatura.

MATERIALE E GEOMETRIE

I provini utilizzati per la caratterizzazione statica e a fatica sono stati ricavati da una piastra di acciaio inossidabile AISI 304L dello spessore di 6 mm. Le geometrie dei provini utilizzate per le prove statiche e a fatica sono riportate rispettivamente in Fig. 2a e Fig. 2b.

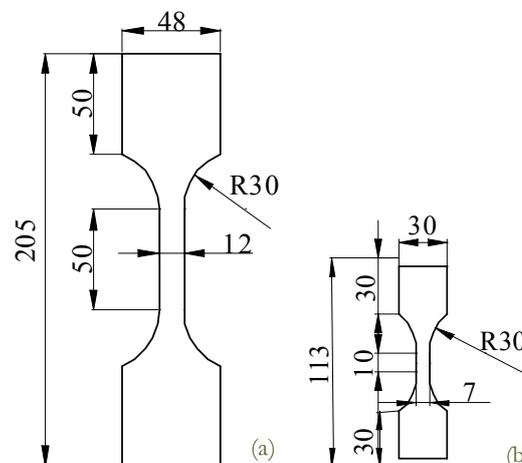


Figura 2: Geometrie dei provini utilizzati per le prove statiche (a) e per le prove di fatica (b).

Le prove sono state eseguite con una macchina servoidraulica Schenck Hydropuls PSA 100 con cella di carico da 100 kN, controllata in anello chiuso con un sistema elettronico Trio Sistemi RT3.

Le prove statiche sono state effettuate in controllo di spostamento, imponendo una velocità della testa mobile della macchina pari a 2 mm/min. Durante l'esecuzione delle prove è stata misurata la deformazione dei provini con un estensometro MTS con base di misura di 25 mm.

Le prove di fatica sono state eseguite in controllo di forza imponendo un'onda sinusoidale con rapporto di ciclo nominale (definito come $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) pari a $R=-1$, con frequenze di prova variabili da 2 a 36 Hz in funzione del carico applicato, come verrà illustrato in seguito. Per la caratterizzazione a fatica del materiale sono state eseguite prove ad ampiezza di tensione costante fino a rottura. Per le prove a due livelli di carico, alcune provette sono state sollecitate ad un primo livello di carico per il 70% circa della loro vita presunta. Successivamente, l'ampiezza di tensione è stata ridotta ad un livello inferiore del 12% rispetto al limite a fatica ad ampiezza costante e mantenuta costante fino alla rottura del campione o fino al raggiungimento di una vita massima pari a 10 milioni di cicli.

La temperatura superficiale dei provini è stata monitorata con una termocamera AGEMA THV 900 LW/ST, sensibile alla radiazione infrarossa nell'intervallo di lunghezze d'onda comprese fra 8 e 12 μm , con una risoluzione di 0.1 °C. Le immagini termografiche sono state elaborate con il software dedicato AGEMA Research 2.1.

RISULTATI DELLE PROVE SPERIMENTALI

Per la caratterizzazione statica del materiale sono state eseguite 5 prove. I valori medi del modulo elastico E , della tensione di scostamento dalla proporzionalità $\sigma_{p0,2}$, della tensione di rottura ingegneristica σ_R e dell'allungamento percentuale a rottura $A\%$ sono riportati in Tab. 1.

Mediante attacco elettrolitico (anodo e catodo di acciaio inossidabile, tensione 1.2 V, corrente 0.2 A) in una soluzione al 60% di acido nitrico è stata messa in evidenza la grana cristallina. Un esempio caratteristico si può osservare in Fig. 3: la matrice bianca è la fase austenitica e le tracce scure all'interno dei grani sono la ferrite, presente in una percentuale di circa l'1%.

Per la valutazione della dimensione del grano si è utilizzato il metodo delle intercette, secondo ASTM E112. Su due campioni di materiale sono state eseguite misurazioni al cuore, al bordo e su una delle superfici esterne della piastra. Per ciascuna di queste zone sono state eseguite tre misurazioni i cui valori medi sono riassunti in Tab. 2. Dall'osservazione dei valori si vede come la dimensione del grano sia maggiore in corrispondenza della superfici esterne, come ci si può aspettare per una piastra ottenuta da laminazione. Confrontando, inoltre, tra loro i valori relativi a ciascun campione, si può concludere che non vi siano variazioni significative. Sono state, infine, effettuate delle prove di microdurezza Vickers, con un carico di 200 g. Nella Tab. 3 si possono osservare i valori ricavati in prossimità del bordo esterno (a circa due decimi di millimetro) e nel cuore della sezione trasversale. Per ciascuna delle zone sono state condotte tre prove. Anche in questo caso non sono apprezzabili differenze significative fra i due campioni. Si può, quindi, concludere che il materiale della piastra utilizzata per la realizzazione dei provini sia sufficientemente omogeneo.

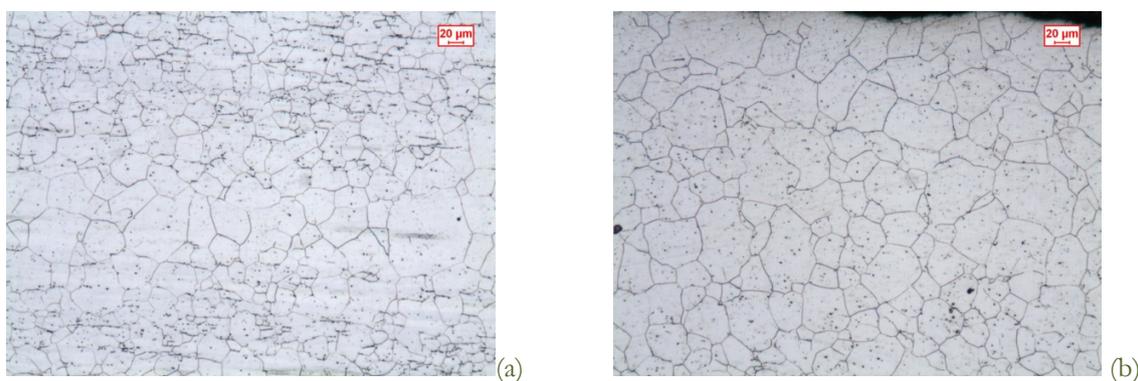


Figura 3: Grana cristallina al cuore (a) e al bordo (b) per l'acciaio AISI 304L analizzato.

E [MPa]	$\sigma_{p0,2}$ [MPa]	σ_R [MPa]	$A\%$
194750	315	699	59%

Tabella 1: Caratteristiche elastiche e di resistenza dell'acciaio AISI 304L.



	Campione 1 [μm]	Campione 2 [μm]
Bordo	36,74	26,99
Cuore	29,84	26,78
Superficie	40,54	35,06

Tabella 2: Dimensione del grano cristallino.

	Campione 1	Campione 2
Bordo	175	155
	163	157
	151	151
Cuore	169	170
	162	163
	162	167

Tabella 3: Valori di microdurezza Vickers, con un carico di 200 g.

Per ridurre i tempi per la caratterizzazione a fatica del materiale, le prove sono state eseguite a frequenze fino a 36 Hz, raffreddando il campione con un getto d'aria in pressione per evitare l'eccessivo riscaldamento del materiale. La temperatura dei provini è stata monitorata in continuo durante l'esecuzione della prova mediante la termocamera. Prima di ogni interruzione della prova per la determinazione del parametro Q, il getto d'aria veniva fermato e veniva regolata la frequenza di prova in modo tale da rilevare una temperatura superficiale stabilizzata del provino pari a quella misurata durante la prova con raffreddamento forzato agente.

Nei prossimi paragrafi sono riportati i risultati delle prove di fatica analizzati in ampiezza di tensione e , successivamente, in termini del parametro energetico Q.

Sintesi dei dati sperimentali a fatica in termini di ampiezza di tensione

Per la determinazione del limite di fatica del materiale è stato utilizzato il metodo degli stair-case brevi ed in particolare è stato applicato il metodo di Dixon [6], utilizzando 7 provini e considerando non rotti i provini che hanno superato i 10 milioni di cicli. Si è quindi ottenuto un valore del limite di fatica, espresso in ampiezza di tensione $\sigma_{A\infty,-1}$, pari a 217 MPa.

Per la determinazione del tratto della vita a termine della curva di Woehler, i dati ottenuti dalle prove a fatica sono stati analizzati statisticamente nell'ipotesi di distribuzione log-normale del numero di cicli a rottura. La curva di Woehler così ottenuta è riportata in Fig. 4, con la banda di dispersione al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa k , l'indice di dispersione dei dati T_σ ($T_\sigma = \sigma_{A,10\%PS} / \sigma_{A,90\%PS}$) attorno al valor medio ed il numero di cicli N_A in corrispondenza del ginocchio della curva. I due dati evidenziati con un triangolo vuoto non sono stati utilizzati per l'analisi statistica e saranno considerati nel prossimo paragrafo.

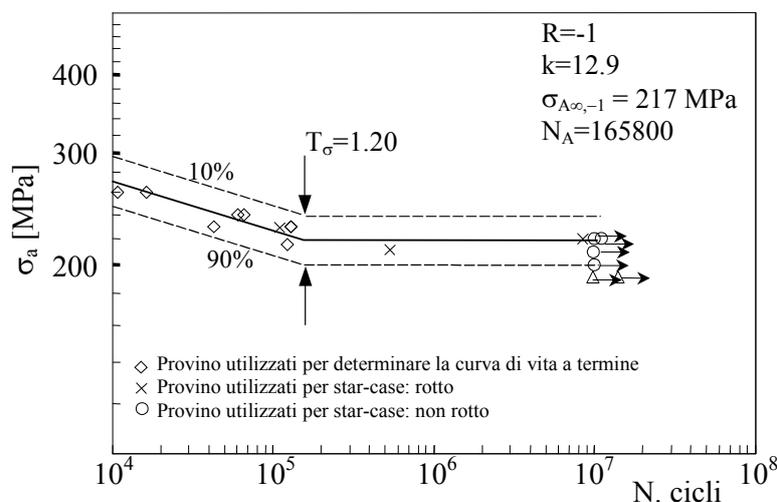


Figura 4: Curva di Woehler dell'acciaio inossidabile AISI 304L.

Sintesi dei dati sperimentali a fatica in termini di densità energia dissipata per ciclo Q

Come già anticipato nella descrizione del modello teorico, per la determinazione del parametro energetico Q è necessario conoscere il gradiente di temperatura nel tempo dopo la brusca interruzione della prova di fatica, il valore della densità del materiale ρ e del suo calore specifico c .

La densità di massa del materiale ρ è stata misurata sperimentalmente con il metodo di Archimede utilizzando una bilancia Sartorius 1801, con una risoluzione di 10^{-4} g, ottenendo un valore di 7940 kg/m^3 . Il calore specifico c è stato misurato con un calorimetro, per mezzo di misure di massa e di capacità termica, ottenendo un valore di $507 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

La temperatura durante il raffreddamento del provino è stata misurata sperimentalmente utilizzando la termocamera ed acquisendo le immagini termiche con una frequenza di campionamento di 7 Hz, secondo quanto descritto in [5]. L'acquisizione è stata fatta considerando la temperatura massima rilevata in corrispondenza della sezione calibrata del provino. Un esempio di immagine termografia è rappresentata in Fig. 5a, in cui è visibile il rettangolo che identifica l'area all'interno della quale viene rilevata la massima temperatura superficiale. Un tipico esempio di andamento della temperatura durante il raffreddamento è rappresentato in Fig. 5b, dove con t_0 si indica l'istante in cui è stata interrotta la prova di fatica, mentre in ordinata viene riportata la variazione di temperatura rispetto a quella di regime raggiunta prima dell'interruzione della prova.

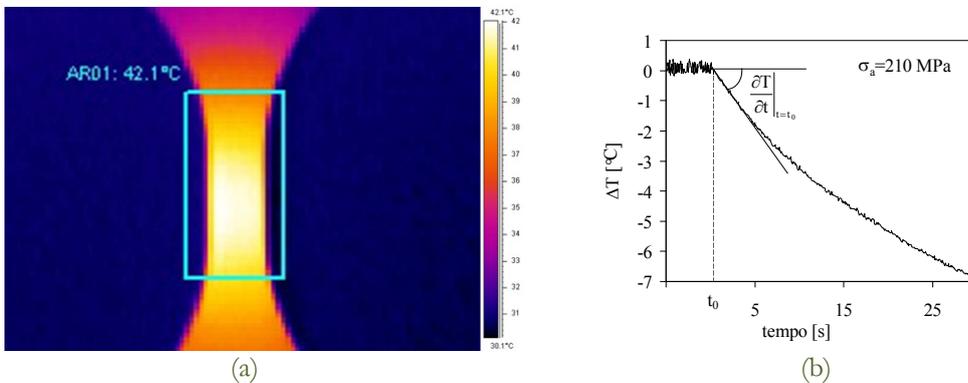


Figura 5: Esempio di misura del raffreddamento del materiale durante una prova di fatica ($\sigma_a=210 \text{ MPa}$, run out)

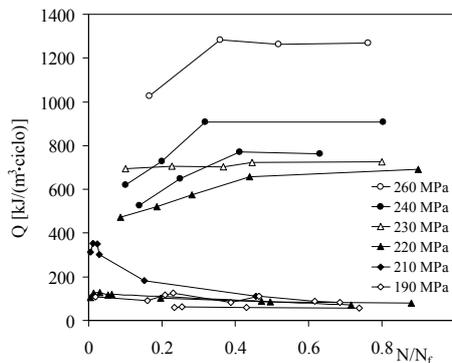


Figura 6: Esempi di andamenti di Q in funzione del numero di cicli nelle prove ad ampiezza costante.

Per monitorare l'andamento di Q in funzione del numero di cicli, sono stati eseguiti più raffreddamenti durante una singola prova. Si è potuto, quindi, osservare che la quantità di energia dissipata per unità di volume e per ciclo Q si stabilizza una volta superata circa metà della vita a fatica. In Fig. 6 sono riportati alcuni valori di Q misurati in funzione del numero di cicli N , normalizzato rispetto al numero di cicli a rottura N_f (nel caso di provini che hanno raggiunto i 10 milioni di cicli senza giungere a rottura, si è normalizzato il numero di cicli rispetto a 10 milioni). Considerando i dati riportati, si può osservare come le curve rappresentate possano essere divise in due categorie, distinte in base al loro andamento. Il primo gruppo è quello che presenta un andamento crescente di Q in funzione del numero di cicli fino a raggiungere un valore costante; il secondo, invece, presenta un andamento opposto, con un tratto iniziale in cui si ha la



diminuzione dell'energia dissipata fino a raggiungere la stabilizzazione. Al primo gruppo appartengono le provette che sono giunte a rottura, al secondo quelle che hanno superato i 10 milioni di cicli.

Considerando, quindi, i valori di Q misurati a stabilizzazione avvenuta, i dati a fatica sono stati analizzati in termini di densità di energia dissipata, nell'ipotesi di distribuzione log-normale del numero di cicli a rottura, secondo la seguente equazione

$$Q^k \cdot N = cost \tag{5}$$

dove N è il numero di cicli a rottura e l'esponente k è una costante da determinare sperimentalmente.

Il risultato della rianalisi è rappresentato in Fig. 7, dove sono riportate la curva media, le curve al 10% e al 90% di probabilità di sopravvivenza, il valore della pendenza inversa k , il valore di Q valutato a 10 milioni di cicli $Q_{A,50\%}$ e l'indice di dispersione dei dati attorno al valor medio T_Q . Dei dati riportati in Fig. 7 con un simbolo diverso (triangolo vuoto), si parlerà nel paragrafo successivo. Osservando la Fig., si può notare come i dati cadano all'interno di un'unica banda a pendenza costante k fino a 10 milioni di cicli, diversamente da quanto accade sintetizzando i dati in ampiezza di tensione.

In Fig. 8 il valore stabilizzato di Q è riportato in funzione dell'ampiezza di tensione applicata durante la prova di fatica. Nella stessa figura è anche riportato con linea continua il valore di $Q_{A,50\%}$ e la banda al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza. La freccia a fianco di un simbolo significa che si tratta di un provino run-out. Osservando i risultati si può subito notare come provette sottoposte ad ampiezze di tensioni diverse, ma con vita a fatica paragonabile in termine di numero di cicli, presentano valori simili di Q . Come già detto, anche per quanto riguarda i dati riportati in Fig. 8 con un triangolo vuoto, si parlerà nel paragrafo successivo.

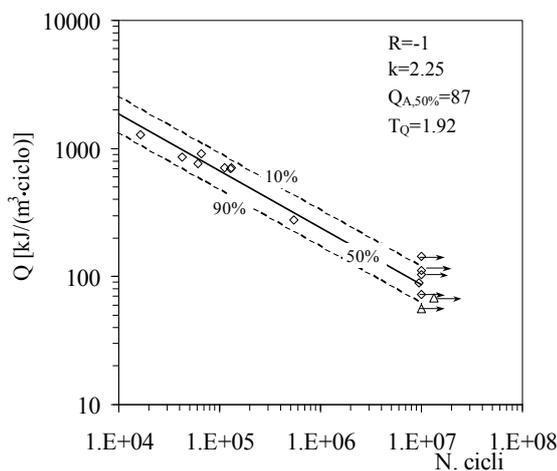


Figura 7: Sintesi dei dati ottenuti nelle prove di fatica ad ampiezza costante in termini della densità di energia dissipata per ciclo Q per un acciaio AISI 304L.

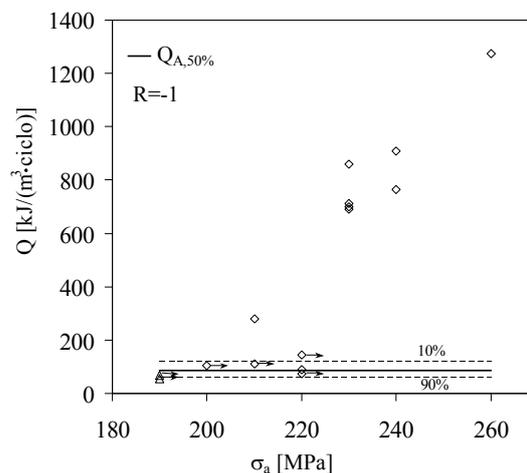


Figura 8: Andamento del valore stabilizzato della densità di energia dissipata per ciclo Q in funzione dell'ampiezza di tensione applicata.

RISULTATI DELLE PROVE A DUE LIVELLI DI CARICO

Con l'obiettivo di indagare l'influenza che la storia precedente ha sulla risposta del materiale in termini del parametro Q , sono state eseguite prove sollecitando un campione a due livelli di carico.

Il valore dell'ampiezza di tensione del primo livello di carico è stato fissato al di sopra del limite di fatica ad ampiezza di sollecitazione costante e pari a 230 MPa. Il secondo livello di carico è stato scelto minore del limite di fatica del materiale ad ampiezza di sollecitazione costante e pari a 190 MPa. Questo valore si posiziona appena al di fuori della banda del 10% di probabilità di sopravvivenza, in modo tale da ridurre le probabilità di avere rottura del campione ad ampiezza di sollecitazione costante. Questo accorgimento è stato infatti necessario per poter misurare la risposta del materiale vergine in termini di Q e poi confrontarlo con quello ottenuto sul materiale acciaccato.

Sono state eseguite 2 prove sul materiale vergine a 190 MPa ed, in entrambi i casi, le prove sono state interrotte per il superamento dei 10 milioni di cicli. Queste due prove sono rappresentate con un triangolo vuoto in Fig. 4. I valori di Q rilevati una volta raggiunta la stabilizzazione sono riportati separatamente dagli altri dati (triangolo vuoto) in Fig. 7 e 8.

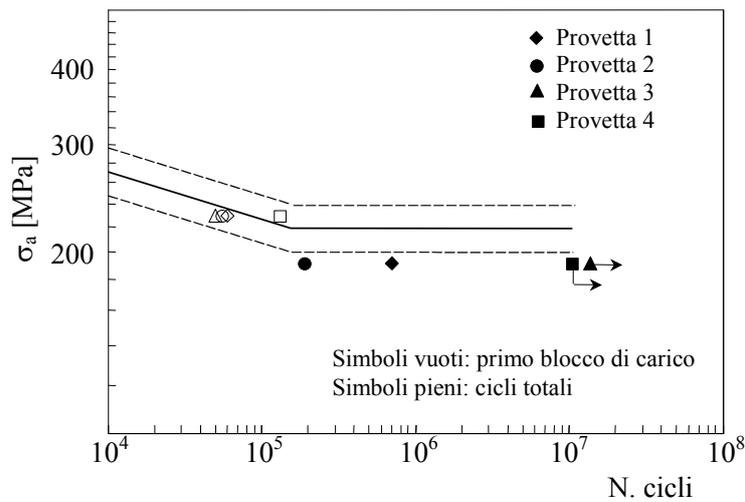


Figura 9: Risultati delle prove a fatica a due livelli di carico e curva di Woehler del materiale determinata con le prove ad ampiezza costante (cfr Fig. 4).

Per analizzare il comportamento a fatica del materiale a due livelli di carico, sono state utilizzate 4 provette. Il primo livello di carico ($\sigma_a=230$ MPa) è stato applicato per un numero di cicli tale da coprire almeno il 70% della vita presunta del provino a tale livello di carico, facendo riferimento alla curva di Woehler di Fig. 4. Si è quindi applicato il secondo livello di carico ($\sigma_a=190$ MPa) mantenendolo fino alla rottura del campione. I risultati ottenuti, in termini di ampiezza di tensione, sono riportati in Fig. 9, dove sono anche riportate le curve di Woehler del materiale determinate ad ampiezza di tensione costante. I simboli vuoti indicano il numero di cicli del primo blocco di carico ed i simboli pieni il numero di cicli totali raggiunto da ciascun provino. Osservando i risultati si vede come solo 2 dei 4 provini testati siano giunti a rottura.

Gli stessi dati sono stati rianalizzati in termini di Q e sono rappresentati in Fig. 10, dove è anche riportata la curva media e la banda al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, valutata ad ampiezza di sollecitazione costante ed il valore medio della densità di energia dissipata, determinata nelle due prove ad ampiezza di tensione costante $\sigma_a=190$ MPa. Considerando il primo livello di carico si può notare che i valori di densità di energia dissipata per ciclo Q sono diversi per ciascuno provino (in particolare la provetta 4) nonostante siano stati sollecitati alle medesima ampiezza di sollecitazione. Conseguentemente la frazione di vita spesa per ciascun campione al primo livello di carico, valutata in riferimento alla curva media che sintetizza i dati in Q , varia rispetto quella valutata considerando la curva di Woehler. Per quanto riguarda il secondo livello di carico, si vede chiaramente come per le due provette (provetta 1 e provetta 2) che sono giunte a rottura siano stati misurati valori di Q nettamente maggiori di quelli rilevati sui provini sollecitati ad ampiezza costante allo stesso livello di tensione. Per le provette 3 e 4, che hanno invece superato i 10 milioni di cicli, i valori di energia dissipata sono risultati simili a quelli dei provini sollecitati allo stesso livello di carico e ad ampiezza di tensione costante. Per questi ultimi, quindi, considerando la risposta del materiale in termini di Q , sembra che non vi sia stata influenza del danneggiamento a fatica subito al livello di carico maggiore. Con riferimento ai dati finora disponibili al tipo di materiale analizzato in questo lavoro, si può quindi affermare che il parametro Q sia sensibile al danneggiamento precedentemente subito dal materiale.

Considerando le sole provette che sono giunte a rottura, è stato calcolato il danneggiamento D subito dal materiale durante le prove di fatica a due livelli di carico secondo la regola di Miner (eq. 6), sulla base della curva di fatica in termini di Q .

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \quad (6)$$

dove n_i è il numero di cicli effettivamente compiuti nel blocco i -esimo e N_i il numero di cicli che portano a rottura ad ampiezza di sollecitazione costante. Confrontando i valori del danneggiamento D ottenuti per le provette 1 e 2 con l'ipotesi di Miner ($D = 1$), si ottiene il grafico di Fig. 11, dove sull'asse delle ascisse è riportata la frazione di vita spesa nel primo blocco di carico (n_1/N_1), sull'asse delle ordinate la frazione di vita spesa nel secondo blocco di carico (n_2/N_2) e la



retta rappresenta l'Eq. 6 nell'ipotesi di $D = 1$. Dalla Fig. 11 si vede, quindi, come l'ipotesi di Miner, applicata sulla curva di fatica in termini di Q , sia in buon accordo con i dati sperimentali.

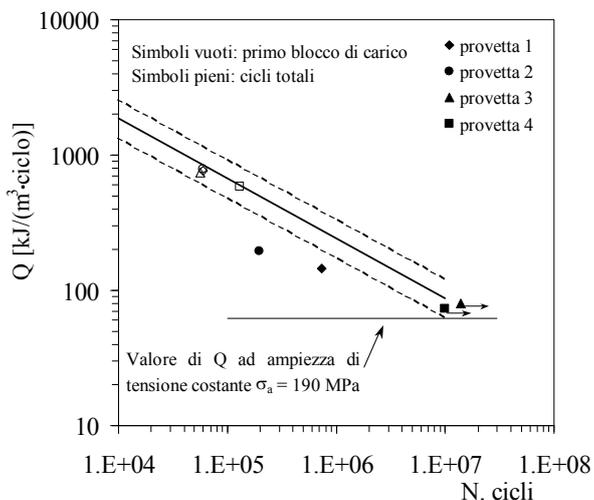


Figura 10: Risultati delle prove a fatica a due livelli di carico analizzati in termini di densità di energia dissipata per ciclo, Q . Le curve rappresentate sono la curva media e la banda al 10% - 90% di probabilità di sopravvivenza ricavate dalle prove ad ampiezza di tensione costante (cfr Fig. 7).

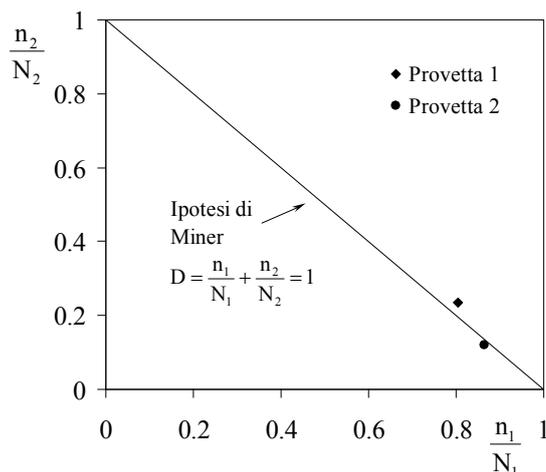


Figura 11: Confronto fra l'ipotesi di Miner applicata sulla curva di fatica in termini di Q e dati sperimentali.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato analizzato il comportamento a fatica di un acciaio inossidabile AISI 304L in termini di densità di energia dissipata dal materiale per ciclo, Q . Dopo aver determinato il limite di fatica ad ampiezza costante del materiale con rapporto di ciclo $R=-1$, i dati delle prove sono stati analizzati sia in termini di ampiezza di tensione, ottenendo la classica curva di Woehler, sia in termini di densità di energia dissipata per ciclo, Q , in accordo a quanto recentemente proposto [1]. Successivamente, sono state eseguite prove a due livelli di carico, con l'obiettivo di valutare se il parametro energetico Q sia sensibile al danneggiamento precedentemente subito del materiale.

Le principali conclusioni di questo lavoro sono le seguenti:

- ✓ la curva di Woehler del materiale determinata ad ampiezza di sollecitazione costante presenta un ginocchio a 165800 cicli.
- ✓ la curva media ottenuta analizzando i dati in termini del parametro energetico Q è caratterizzata da una pendenza costante fino a 10 milioni di cicli con un indice di dispersione dei dati attorno al valor medio T_Q pari a 1.92.



- ✓ dallo studio del comportamento a fatica del materiale a due livelli di carico si è visto che il parametro energetico Q , limitatamente ai risultati disponibili e al materiale analizzato, è risultato sensibile al danneggiamento precedentemente subito dal materiale.
- ✓ La regola di Miner applicata sulla base della curva di fatica in termini di Q si è rivelata in accordo con i dati sperimentali, limitatamente ai risultati disponibili e al materiale analizzato.

Bibliografia

- [1] G. Meneghetti, *Int. J. of Fatigue*, 29 (2007) 81.
- [2] J. Kaleta, R. Blotny, H. Harig, *J. Test Eval.*, 19 (1990) 326.
- [3] G. La Rosa, A. Risitano, *Int. J. of Fatigue*, 22 (2000) 65.
- [4] B. Atzori, E. Gasparini, G. Meneghetti, In: XXX Convegno Nazionale AIAS, Alghero (SS) (2001)367.
- [5] G. Meneghetti, C. Vanzin, In: XXXI Convegno Nazionale AIAS, Parma (2002).
- [6] W. Dixon, F. Massey, *Introduction to statistical analysis*, McGraw-Hill, New York (1966).