



## The specific heat loss combined with the thermoelastic effect for an experimental analysis of the mean stress influence on axial fatigue of stainless steel plain specimens

### Analisi sperimentale dell'influenza della tensione media in prove di fatica assiale su provini lisci in acciaio inossidabile basata sull'energia specifica dissipata e l'effetto termoelastico

G. Meneghetti, M. Ricotta, L. Negrisola, B. Atzori

*Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova, via Venezia, 1, 35131, Padova*

**ABSTRACT.** The energy dissipated to the surroundings as heat in a unit volume of material per cycle,  $Q$ , was recently proposed by the authors as fatigue damage index and it was successfully applied to correlate fatigue data obtained by carrying out fully reversed stress- and strain-controlled fatigue tests on AISI 304 L stainless steel plain and notched specimens. The use of the  $Q$  parameter to analyse the experimental results led to the definition of a scatter band having constant slope from the low- to the high cycle fatigue regime. In this paper the energy approach is extended to analyse the influence of mean stress on the axial fatigue behaviour of un-notched cold drawn AISI 304 L stainless steel bars. In view of this, stress controlled fatigue tests on plain specimens at different load ratio  $R$  ( $R=-1$ ;  $R=0.1$ ;  $R=0.5$ ) were carried out. A new energy parameter is defined to account for the mean stress effect, which combines the specific heat loss  $Q$  and the relative temperature due to the thermoelastic effect corresponding to the achievement of the maximum stress. The new two-parameter approach was able to rationalise the mean stress effect observed experimentally. It is worth noting that the results found in the present contribution are meant to be specific for the material and testing condition investigated.

**SOMMARIO.** L'energia dissipata per unità di volume e per ciclo  $Q$  è stata recentemente proposta dagli autori come indicatore del danneggiamento a fatica ed applicata per la sintesi di dati sperimentali ottenuti da prove a fatica eseguite sia in controllo di deformazione sia in controllo di forza a rapporto di ciclo  $R=-1$ , su provini lisci ed intagliati in acciaio inossidabile AISI 304 L. La sintesi in termini del parametro  $Q$  ha permesso di definire un'unica banda di dispersione con pendenza costante da 100 a 2 milioni di cicli. In questo lavoro, l'approccio energetico è stato esteso per considerare l'influenza della tensione media nel comportamento a fatica di provini cilindrici ottenuti da barra trafilata a freddo in acciaio AISI 304 L. A tal fine sono state eseguite prove a fatica assiale a diversi rapporti di ciclo:  $R=-1$ ,  $R=0.1$  ed  $R=0.5$ . L'influenza della tensione media è stata considerata combinando l'energia specifica dissipata  $Q$  con la temperatura dovuta all'effetto termoelastico corrispondente al raggiungimento della massima tensione del ciclo di fatica. Il nuovo approccio energetico a due parametri ha consentito la sintesi in un'unica banda di dispersione dei risultati delle prove di fatica eseguite a diversi valori del rapporto di ciclo. Si ritiene importante sottolineare che i risultati finora ottenuti non sono stati ancora estesi a materiali e condizioni di prova diversi da quelli presentati in questa memoria.



**KEYWORDS.** Fatigue assessment, energy dissipation, thermoelasticity, temperature, mean stress effect, thermometric methods

## INTRODUZIONE

Il monitoraggio del danneggiamento e la stima della vita a fatica di componenti può essere fatto sperimentalmente utilizzando misure di temperatura superficiale. È noto infatti che un materiale sollecitato a fatica subisce un aumento di temperatura tanto maggiore, a parità di altri fattori, quanto maggiore è l'ampiezza di tensione applicata. In un lavoro pionieristico, Stoy Meyer [1] utilizzò l'energia dissipata per stimare il limite a fatica di provini lisci in acciaio. Stoy Meyer usò una piccola portata d'acqua che lambiva il provino misurando la differenza di temperatura tra monte e valle del provino stesso durante la prova. Più recentemente, Curti et al. hanno definito la temperatura limite in prove a fatica [2] e successivamente La Rosa e Risitano hanno definito una metodologia per la determinazione rapida del limite di fatica [3] basata su misure di temperatura mediante termocamera. Successivamente, Risitano et al. hanno esteso la metodologia per la stima di vita a fatica all'ampiezza variabile [4] e hanno proposto un metodo termografico per la stima del limite a fatica con tensione media nulla a partire da una prova statica a trazione [5]. Curà et al. hanno elaborato una metodologia per la determinazione rapida del limite di fatica basata su un metodo iterativo per distinguere i rilievi di temperatura ottenuti da livelli di tensione superiori o inferiori, rispettivamente, al limite a fatica [6]. Giancane et al. hanno analizzato approfonditamente la distribuzione delle sorgenti termiche non uniformi in prove a fatica su leghe leggere [7]. In [8] è stato suggerito di utilizzare le misure di temperatura per risalire all'energia specifica dissipata dal materiale per ciclo  $Q$ , quale parametro da utilizzare per le verifiche a fatica sperimentali basate su metodi termometrici. Recentemente [9] è stata proposta una sintesi di risultati di prove a fatica assiali ottenute con prove in controllo di tensione o deformazione con ciclo simmetrico rispetto all'origine (rapporto di ciclo in tensione  $R_\sigma$  o in deformazione  $R_\epsilon$  pari a -1) su un acciaio inossidabile AISI 304 L. Le geometrie dei provini includevano provini lisci e intagliati con raggio di raccordo variabile fra 3 mm e 8 mm. Attualmente la sintesi include circa 100 risultati di prove sperimentali come mostrato nelle Fig. 1 e 2, in termini di ampiezza di tensione netta ed energia specifica dissipata dal materiale, rispettivamente. L'utilizzo dell'energia specifica dissipata dal materiale è vantaggioso perché è indipendente dalle condizioni al contorno termiche e meccaniche di prova, quali ad esempio la geometria del provino, la frequenza di prova, la temperatura dell'ambiente di prova che definisce le condizioni al contorno che governano lo scambio termico tra il componente in prova e l'ambiente stesso. Per stimare sperimentalmente l'energia specifica dissipata per ciclo  $Q$  è stata proposta [8] una tecnica sperimentale che ha il vantaggio di essere semplice da utilizzare nel corso di prove a fatica e non richiede il monitoraggio delle condizioni al contorno termico durante la prova. Infatti è stato dimostrato che è possibile stimare il parametro  $Q$  semplicemente interrompendo bruscamente la prova, dopo il raggiungimento della temperatura stabilizzata, e misurando il gradiente di raffreddamento immediatamente dopo l'interruzione della prova:

$$Q = -\frac{\rho \cdot c \cdot \partial T / \partial t}{f} \quad (1)$$

in cui  $T(t)$  è la temperatura dipendente dal tempo nel punto di misura,  $\rho$  la densità del materiale,  $c$  il calore specifico ed  $f$  la frequenza del carico ciclico.

Scopo di questo lavoro è quello di includere l'effetto della tensione media nell'approccio energetico, fino ad ora validato solo considerando effetti geometrici di concentrazione delle tensioni in prove con ciclo simmetrico rispetto all'origine, come mostrato nelle precedenti Fig. 1 e 2. Nella letteratura esistono approcci, più consolidati di quello energetico, che considerano grandezze meccaniche combinate in un parametro che permette di tenere conto della tensione media. Fra gli approcci per la stima di vita a fatica a innesco, Smith, Watson e Topper [10] proposero di utilizzare il parametro SWT:

$$SWT = \sqrt{\sigma_{\max} \cdot E \cdot \epsilon_a} \quad (2)$$

per estendere l'equazione della curva di fatica proposta da Manson-Coffin, a qualunque livello di tensione media. Nel parametro SWT,  $\epsilon_a$  è l'ampiezza della deformazione elasto-plastica,  $E$  il modulo elastico del materiale e  $\sigma_{\max}$  è la tensione massima. Fra gli approcci basati sulla meccanica della frattura per la stima di vita a fatica di componenti contenenti difetti o cricche, Walker [11], e più recentemente Vasudevan, Sadananda e Glinka [12], Kujawski [13,14] e Stoychev e Kujawski [15] hanno proposto di utilizzare due grandezze meccaniche combinate nel parametro:

$$\Delta K_{eqv} = \Delta K^{(1-\alpha)} \cdot K_{max}^{\alpha} \quad (3)$$

per correlare i risultati sperimentali relativi a misure di velocità di propagazione di cricche. Nell'espressione (3),  $\Delta K$  e  $K_{max}$  sono rispettivamente il range e il valore massimo del fattore di intensificazione delle tensioni, mentre  $\alpha$  è una costante da calibrare sui dati sperimentali.

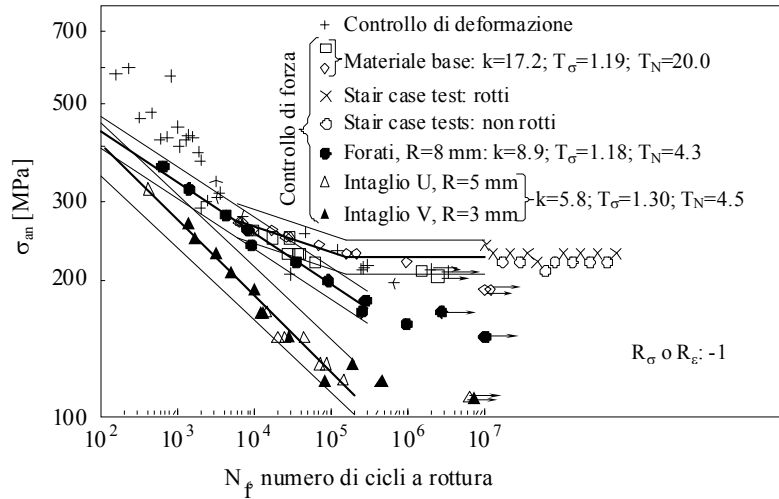


Figura 1: Sintesi dei risultati delle prove a fatica in termini di ampiezza di tensione netta (circa 100 dati) [9].

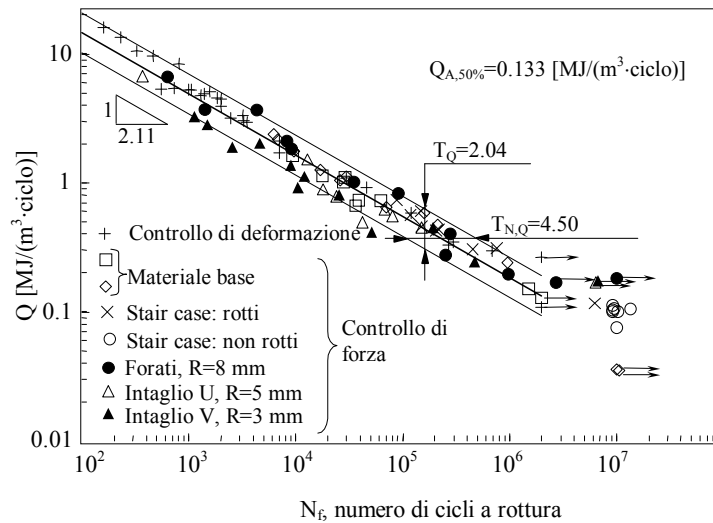


Figura 2: Sintesi dei risultati delle prove a fatica in termini di densità di energia dissipata per ciclo (circa 100 dati) [9].

I parametri (2) e (3) mostrano che la forza motrice del processo di innesco e propagazione della cricca è governata da due grandezze: l'ampiezza (o il range) della grandezza fisica e il suo livello (caratterizzato dal valore massimo). Gli autori hanno interpretato in termini energetici le due grandezze coinvolte in ciascuno dei parametri (2) e (3), immaginando che la resistenza a fatica dipenda da una grandezza di scambio dell'energia e una grandezza di stato. La grandezza di scambio è l'energia specifica dissipata per ciclo già utilizzata nei lavori precedenti [8,9], mentre quale grandezza di stato (o di livello) è stata assunta la temperatura  $T_{the}$  che il materiale raggiungerebbe per effetto termoelastico (perciò adiabatico) qualora fosse sottoposto alla tensione massima  $\sigma_{max}$  del ciclo a fatica. La temperatura termoelastica corrispondente all'applicazione del carico massimo del ciclo di fatica può essere valutato sperimentalmente sollecitando in campo lineare elastico il provino ed estrapolando la relazione (temperatura – tensione applicata) al valore  $\sigma_{max}$ . La velocità di applicazione del carico dovrà essere sufficientemente elevata da rendere trascurabili gli effetti di scambio termico con l'ambiente. Come si vedrà nel seguito, almeno per le prove descritte in questo lavoro, tali velocità sono assolutamente compatibili con le attrezzature e le



condizioni di prova che normalmente si hanno in laboratorio. In alternativa la temperatura termoelastica  $T_{the}$  può essere stimata utilizzando l'espressione (4), che la correla alla tensione applicata [16]:

$$\frac{T_{the}}{T_0} = - \left( \frac{\alpha}{\rho \cdot c} \right) \cdot \sigma_{max} \quad (4)$$

in cui  $T_0$  è la temperatura iniziale quando la tensione applicata è pari a zero e  $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione termica del materiale. Pertanto, l'equazione proposta per sintetizzare il comportamento a fatica includendo l'effetto della tensione media combina la grandezza di scambio  $Q$  con quella di stato  $T_{the}/T_0$ :

$$\left( Q \cdot \left( \frac{|T_{the}|}{T_0} \right)^h \right)^m \cdot N_f = (\bar{Q})^m \cdot N_f = \text{cost} \quad (5)$$

in cui  $h$  ed  $m$  sono costanti da calibrare sui risultati sperimentali.

### MATERIALE, GEOMETRIA DEI PROVINI E MODALITÀ DI PROVA

Sono stati considerati risultati di prove di fatica eseguite in controllo di forza e 3 diversi rapporti di ciclo ( $R=-1$ ,  $R=0.1$  e  $R=0.5$ ) su provini cilindrici, ottenuti a partire da barre di acciaio inossidabile AISI 304 L trafilate a freddo aventi diametro pari a 25 mm e tensione di scostamento dalla proporzionalità di 468 MPa. Il materiale utilizzato nel presente lavoro è diverso da quello utilizzato in [9], che invece era laminato a caldo con tensione di scostamento dalla proporzionalità pari a 315 MPa. Le geometrie delle provette sono rappresentate in Fig. 3. Più precisamente, per rapporti di ciclo  $R=-1$  e  $R=0.1$  è stata utilizzata la geometria di Fig. 3a e per  $R=0.5$  la geometria di Fig. 3b. In [17] sono state misurate le caratteristiche meccaniche del materiale (modulo elastico  $E$ , tensione di scostamento dalla proporzionalità  $R_{p0.2}$ , tensione di rottura  $R_m$ , allungamento percentuale dopo rottura  $A\%$ ), la composizione chimica, la durezza Vickers HV 30 e la dimensione media del grano cristallino, valutato secondo la normativa ASTM E 112 [18], e sono qui riassunte in Tab. 1.

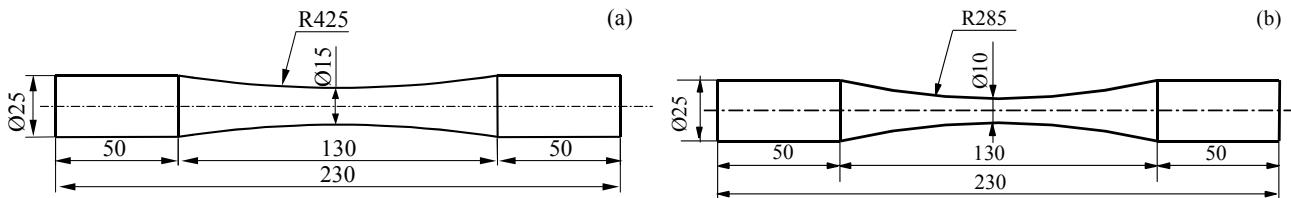


Figura 3: Geometria dei provini utilizzati per le prove di fatica per a) rapporti di ciclo  $R=-1$  e  $R=0.1$  e b)  $R=0.5$ .

E	$R_{p0.2}$	$R_m$	A	HV 30	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Diametro equivalente
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]		%	%	%	%	%	%	%	[ $\mu\text{m}$ ]
192200	468	691	43	199	0.013	0.58	1.81	18.00	0.44	8.00	0.55	35

Tabella 1: Caratteristiche dell'acciaio AISI 304 L trafilato a freddo utilizzato nelle prove di fatica.

Le prove di fatica sono state eseguite con una macchina idraulica servocontrollata MFL con cella di carico di 250 kN e controllore digitale MTS Testar II in controllo di forza, imponendo un'onda sinusoidale e frequenze di prova variabili fra 1 e 30 Hz in funzione della tensione applicata. Per mantenere la temperatura stabilizzata del materiale sotto ai  $70^\circ\text{C}$ , è stato utilizzato un ventilatore per raffreddare i provini. Circa 10 minuti prima di ogni raffreddamento il ventilatore veniva spento e contemporaneamente ridotta la frequenza di prova in modo da mantenere costante la temperatura del materiale. Quindi il test veniva interrotto bruscamente per misurare il gradiente di raffreddamento, da cui quindi la densità di energia dissipata per ciclo  $Q$ , in accordo alla metodologia sperimentale introdotta in [8]. Infine, le prove sono state interrotte in corrispondenza della rottura del campione o al raggiungimento dei 2 milioni di cicli.

Per la misura sperimentale della costante termoelastica  $K_m$ , sono state eseguite rampe in controllo di forza a diverse velocità di applicazione del carico utilizzando una macchina servoidraulica Schenck Hydropuls PSA 100 con cella di carico da 100 kN e controllore digitale Trio Sistemi RT3.

In tutte le prove eseguite, la temperatura è stata monitorata con termocoppie rame-costantina di diametro pari a 0.127 mm ed un'accuratezza di  $0.02^\circ\text{C}$ , incollate in corrispondenza della sezione ristretta del provino, utilizzando una colla epossidica caricata argento. I segnali di temperatura provenienti dalle termocoppie sono stati acquisiti con una centralina di acquisizione Agilent Technologies HP 34970A, avente una frequenza massima di campionamento dei dati,  $f_{acq}$ , di 22 Hz.

## RISULTATI DELLE PROVE DI FATICA

In questo paragrafo sono riportati i risultati delle prove di fatica in termini di ampiezza di tensione  $\sigma_a$ , per i diversi rapporti di ciclo analizzati. Si ritiene importante osservare che in tutte le prove eseguite a rapporto di ciclo pari a  $R=0.5$ , la massima tensione raggiunta nel ciclo di fatica  $\sigma_{max}$  ha superato la tensione di snervamento del materiale. Una volta raggiunta la stabilizzazione del materiale, valutata facendo riferimento allo spostamento rilevato dal sensore LVDT della macchina di prova, è stato misurato il diametro della sezione ristretta, osservando riduzioni percentuali del diametro dovute alla plasticità variabili dal 4.5% al 19.5% (valutate rispetto al diametro misurato prima dell'inizio della prova), in funzione dell'ampiezza di tensione applicata. Per le prove eseguite a  $R=0.5$ , si è quindi calcolata l'ampiezza di tensione sulla sezione vera dei provini. La Fig. 4 riporta i risultati di tutte le prove di fatica, sintetizzati in termini di ampiezza di tensione, con le curve medie, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, le pendenze inverse  $k$ , la resistenza a fatica  $\sigma_{A,50\%}$  valutata a  $N_A=2$  milioni di cicli con probabilità di sopravvivenza del 50% ed i coefficienti di dispersione  $T_\sigma$  e  $T_N$  in ampiezza di tensione e numero di cicli a rottura, rispettivamente. I dati sono stati rianalizzati statisticamente nell'ipotesi di distribuzione log-normale nel numero di cicli a rottura e con un livello di confidenza dei dati del 95%.

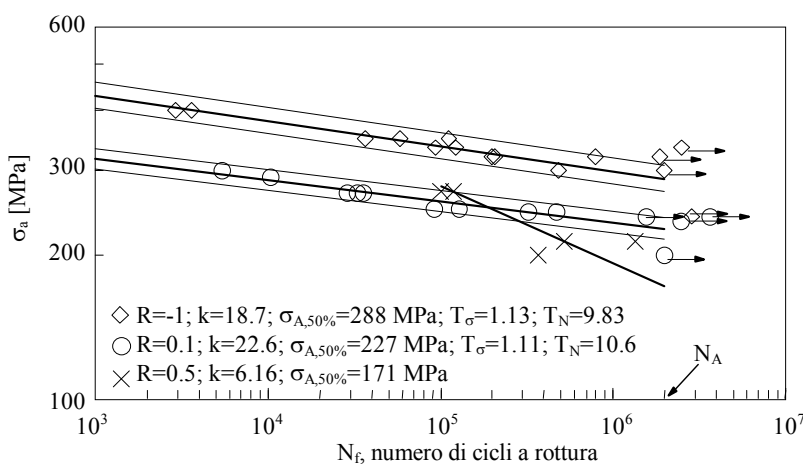


Figura 4: Risultati delle prove a fatica in termini di ampiezza di tensione vera per i diversi rapporti di ciclo

Dai risultati ottenuti si può osservare una diminuzione della  $\sigma_{A,50\%}$  all'aumentare del rapporto di ciclo imposto con una fattore di riduzione pari a 1.27, passando da  $R=-1$  a  $R=0.1$ , e uguale a 1.33 passando da  $R=0.1$  a  $R=0.5$ .

## RISULTATI IN TERMINI DI DENSITÀ DI ENERGIA DISSIPATA PER CICLO, Q

Gli andamenti caratteristici del parametro  $Q$  misurati durante le prove di fatica tramite l'espressione (1) ( $\rho=7940$  kg/m<sup>3</sup>,  $c=507$  J/(kg·K)) per i diversi rapporti di ciclo analizzati sono riportati in Fig. 5 in funzione del numero di cicli, normalizzato rispetto al numero di cicli a rottura  $N_f$ . Nel caso di provini non rotti il numero di cicli è stato



normalizzato rispetto al valore di 2 milioni. Si può osservare che considerando i diversi rapporti di ciclo, la variazione di  $Q$  è compresa fra 0.01 e 5 MJ/(m<sup>3</sup>·ciclo), contro una variazione delle ampiezze di tensione (cfr Fig. 4) compresa fra 200 e 400 MPa.

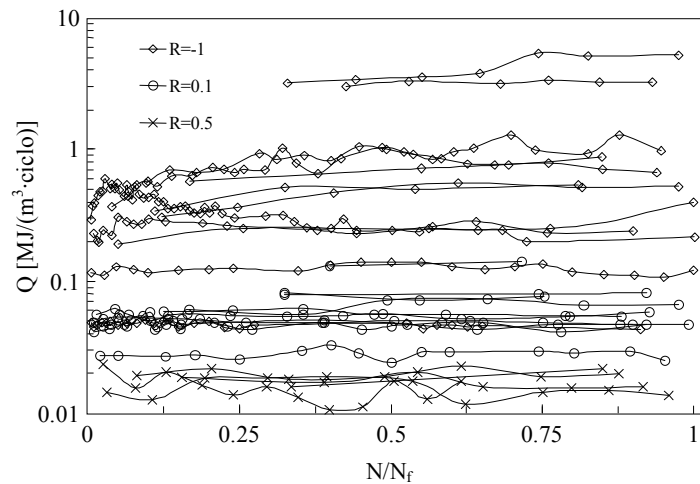


Figura 5: Andamenti di  $Q$  misurati durante le prove di fatica per l'acciaio AISI 304 L per i tre diversi rapporti di ciclo

In accordo a quanto fatto in [9, 19], i risultati delle prove di fatica sono stati rianalizzati utilizzando il valore caratteristico di  $Q$  misurato al 50% del numero di cicli a rottura e nell'ipotesi di distribuzione log-normale del numero di cicli a rottura e con un livello di confidenza del 95% secondo l'espressione:

$$Q^k \cdot N_f = \text{cost} \quad (6)$$

dove l'esponente  $k$  è una costante da determinare sperimentalmente.

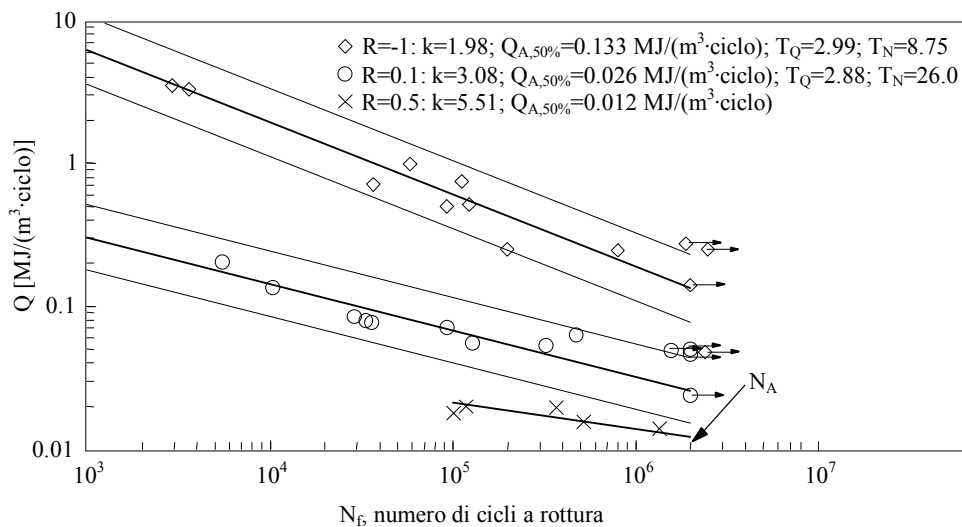


Figura 6: Risultati delle prove a fatica in termini di densità di energia dissipata per i diversi rapporti di ciclo

Il risultato è riportato in Fig. 6, dove sono mostrate per ciascun rapporto di ciclo, 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 2 milioni di cicli  $Q_{A,50\%}$  con probabilità di sopravvivenza del 50%, l'indice di dispersione dei dati in energia dissipata  $T_Q$  ed in vita  $T_N$ . In accordo a [8], si può vedere come i dati di prove di fatica ottenuti a diversi rapporti di ciclo non siano sintetizzabili in un'unica curva, utilizzando il solo parametro energetico  $Q$ .



## DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA COSTANTE TERMOELASTICA

Per la determinazione sperimentale della costante termoelastica  $K_m$ , che lega la temperatura termoelastica  $T_{the}$  alla tensione applicata secondo la relazione:

$$\frac{T_{the}}{T_0} = -K_m \cdot \sigma_{max} \quad (7)$$

sono state eseguite rampe di carico in controllo di forza a diverse velocità, al fine di valutare il valore minimo della velocità di applicazione della tensione  $\dot{\sigma}$  da imporre per garantire condizioni di prova adiabatiche. In particolare, le prove sono state eseguite a  $\dot{\sigma} = 5, 19, 37, 54$  e  $73$  MPa/s. Le prove sono state eseguite applicando al provino una tensione di compressione pari a  $-150$  MPa e successivamente è stata eseguita la rampa fino a  $+150$  MPa. Il valore di tensione di  $150$  MPa è stato scelto con il fine di restare all'interno del campo di comportamento lineare elastico del materiale. Per ciascuna velocità impostata sono state eseguite quattro prove. La procedura di prova può essere quindi sintetizzata come segue:

- applicazione dello carico di compressione pari a  $-150$  MPa;
- mantenimento del carico di compressione per un tempo sufficiente affinché il materiale raggiungesse l'equilibrio termico con l'ambiente (temperatura di riferimento  $T_0$ );
- fissato un valore di  $\dot{\sigma}$ , esecuzione della rampa di carico fino a  $+150$  MPa con acquisizione della temperatura del materiale: essendo la temperatura  $T_0$  riferita al livello di tensione  $-150$  MPa, la temperatura termoelastica  $T_{the}$  al termine della prova andrà riferita ad una tensione pari a  $\Delta\sigma=300$  MPa.

In Fig. 7 è riportato un esempio di una prova eseguita a  $\dot{\sigma} = 54$  MPa/s. Dal tempo  $t=t_i$  fino al tempo  $t=t_f$  si può vedere il raffreddamento relativo del materiale dalla temperatura iniziale  $T_0=301.25$  K. Il range di tensione considerato per il calcolo di  $K_m$  è quello che si osserva nell'intervallo temporale  $\Delta t=t_f-t_i$ , ( $\Delta\sigma=\sigma(t_f)-\sigma(t_i)$ ), che nel caso dell'esempio di Fig. 7 risulta pari a  $297$  MPa.

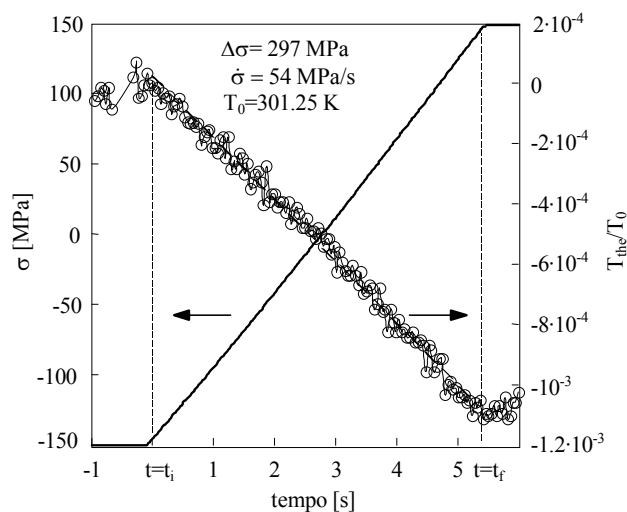


Figura 7: Esempio di prova statica di trazione e variazione relativa di temperatura termoelastica  $T_{the}$  ( $\dot{\sigma}=54$  MPa/s).

La Fig. 8 riporta i valori di  $K_m$  misurati in tutte le prove statiche eseguite e la curva media. Si può osservare che, all'aumentare della velocità di applicazione del carico, diminuisce la dispersione dei dati attorno al valor medio e che variando la  $\dot{\sigma}$  di un fattore circa 2 (da  $37$  a  $73$  MPa/s) il valor medio di  $K_m$  diminuisce del  $5.4\%$  (da  $3.86 \cdot 10^{-12}$  a  $3.65 \cdot 10^{-12}$  Pa $^{-1}$ ). Da un punto di vista ingegneristico si può quindi concludere che, per le condizioni di prova e per il materiale qui analizzati, le condizioni di adiabaticità in una prova statica di trazione possono essere raggiunte con velocità di applicazione della tensione  $\dot{\sigma} \geq 37$  MPa/s. Il valore di  $K_m$  che sarà di seguito utilizzato è stato considerato pari alle media dei valori ottenuti per  $\dot{\sigma}=37, 54$  e  $73$  MPa/s e pari quindi a  $3.75 \cdot 10^{-12}$  Pa $^{-1}$ . Stimando il valore di  $K_m$  da (4) con  $\alpha=16 \cdot 10^{-6}$  K $^{-1}$  si ottiene  $3.97 \cdot 10^{-12}$  Pa $^{-1}$ , in buon accordo con il valore sperimentale.



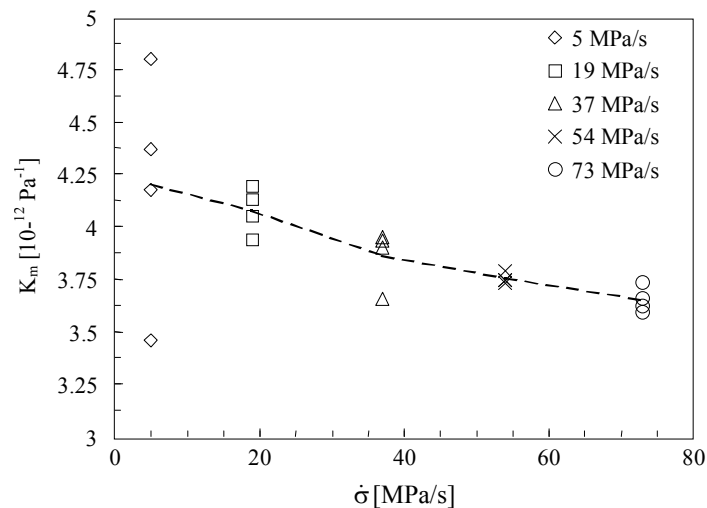


Figura 8: Determinazione sperimentale della costante termoelastica  $K_m$  per l'acciaio inossidabile AISI 304 L.

### SINTESI DEI RISULTATI CON IL NUOVO APPROCCIO ENERGETICO A DUE PARAMETRI

La stima sperimentale della costante termoelastica  $K_m$  ha consentito di determinare per ogni provino la temperatura termoelastica relativa in accordo con l'espressione (7). Noti quindi per ciascun provino i valori di  $Q$ ,  $\frac{T_{the}}{T_0}$  ed il numero di cicli a rottura  $N_f$  è stato possibile determinare gli esponenti incogniti  $b$  ed  $m$  della (5). Per la determinazione della costante  $b$ , i dati sperimentali sono stati rianalizzati in un piano  $Q$ - $(T_{the}/T_0)$  per un fissato numero di cicli a rottura, tracciando così delle curve iso-durata, come riportato in Fig. 9.

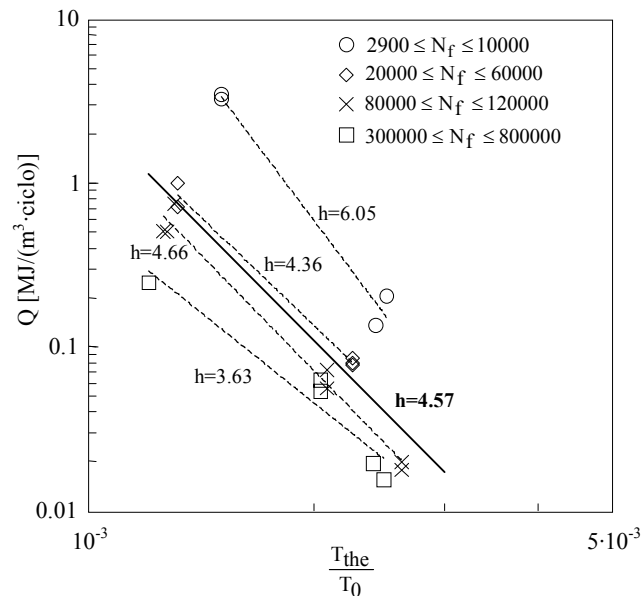


Figura 9: Determinazione della costante  $b$  (Eq. 5).

Considerando i dati a disposizione ed indipendentemente dal rapporto di ciclo, i risultati delle prove di fatica sono stati suddivisi in 4 gruppi, caratterizzati da un diverso intervallo del numero di cicli a rottura ( $N_f \leq 10000$  cicli;  $20000 \leq N_f \leq 60000$  cicli;  $80000 \leq N_f \leq 120000$  cicli e  $300000 \leq N_f \leq 800000$  cicli). Per ogni gruppo è stato quindi determinato il valore dell'esponente  $h$ , dove le rette di regressione (in scale bi-logaritmiche) sono rappresentate con linee tratteggiate. La Fig. 9 suggerisce che con ragionevole approssimazione si può ritenere che la vita a fatica sia una funzione unica del parametro





$Q \cdot (T_{the}/T_0)^h$ . Pertanto, considerando i dati come un'unica popolazione è stata determinata la retta di regressione continua in Fig. 9, avente una pendenza  $b=4.57$ .

Per la determinazione dell'esponente  $m$ , i dati di tutte le prove sperimentali sono stati riportati in un piano  $\bar{Q}-N_f$  (cfr Eq. 5,  $h=4.57$ ) e rianalizzati come un'unica popolazione, indipendentemente dal rapporto di ciclo, nell'ipotesi di distribuzione log-normale del numero di cicli a rottura e con un livello di confidenza dei dati del 95%. Il risultato è riportato in Fig. 10, dove sono rappresentate la curva media, le curve al 10% e al 90% di probabilità di sopravvivenza, il valore della pendenza inversa  $m$ , l'indice di dispersione dei dati attorno al valor medio in energia dissipata equivalente  $T_{\bar{Q}}$  ed in vita  $T_N$ .

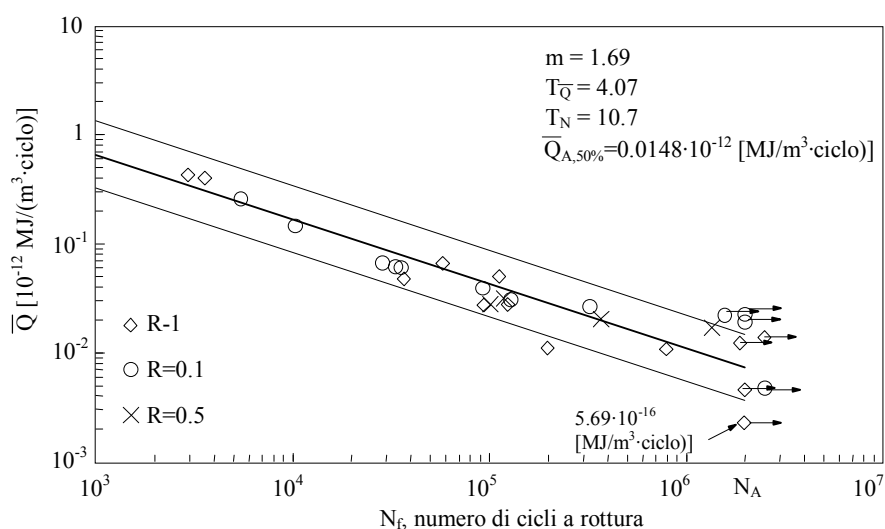


Figura 10: Sintesi dei risultati delle prove a fatica in termini di energia dissipata corretta  $\bar{Q}$  (Eq. 5) per i diversi rapporti di ciclo.

Dal confronto con i dati presentati sia in termini di ampiezza di tensione (Fig. 4) sia in termini di energia dissipata  $Q$  (Fig. 6), si vede che utilizzando il nuovo parametro  $\bar{Q}$  i dati possono essere sintetizzati da una curva a pendenza costante da 1000 a  $2 \times 10^6$  cicli indipendentemente dal rapporto di ciclo e che l'ampiezza della banda di dispersione in vita  $T_N$ , ottenuta elaborando insieme tutti i dati, è paragonabile sia alle serie "R=-1" e "R=0.1", ottenute a partire dai dati sintetizzati in termini di ampiezza di tensione (Fig. 4), sia alla serie "R=-1" determinata a partire dai dati rianalizzati in termini di densità di energia dissipata per ciclo  $Q$  (Fig. 6).

## CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato proposto un nuovo approccio energetico a due parametri per sintetizzare l'influenza della tensione media nel comportamento a fatica di provini cilindrici ottenuti da barra trafilata a freddo di acciaio inossidabile AISI 304 L. A tal fine sono state eseguite prove a fatica assiale a tre diversi rapporti di ciclo R=1, R=0.1 ed R=0.5. L'influenza della tensione media è stata considerata combinando la densità di energia dissipata per ciclo  $Q$  con la temperatura relativa dovuta all'effetto termoelastico  $T_{the}$ , corrispondente al raggiungimento della massima tensione del ciclo di fatica, rispetto alla temperatura iniziale  $T_0$ , quando la tensione applicata è pari a zero. Il nuovo approccio energetico a due parametri ha consentito la sintesi in un'unica banda di dispersione dei risultati delle prove di fatica eseguite ai diversi valori del rapporto di ciclo con un'unica banda di dispersione a pendenza costante da 1000 a 2 milioni di cicli.

Con alcune prove statiche eseguite a diverse velocità di applicazione del carico, inoltre, si è determinata sperimentalmente la costante termoelastica dell'acciaio AISI 304 L, che ha consentito la determinazione di  $T_{the}$  nota la massima tensione del ciclo di fatica, e si è osservato come il raggiungimento di condizioni di prova adiabatiche si possa ottenere con le normali attrezzature di prova a fatica disponibili in laboratorio. Nel caso in esame, le condizioni di adiabaticità si sono ottenute con velocità di applicazione del carico maggiori o uguali a 37 MPa/s.



Infine, si ritiene importante sottolineare che i risultati finora ottenuti non sono stati ancora estesi a materiali e condizioni di prova diversi da quelli presentati in questa memoria.

## RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito del Progetto di Ricerca Nazionale PRIN 2009Z55NWC. Gli autori sono grati per il supporto finanziario.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C.E. Stoy Meyer, In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 90 (1914), 411.
- [2] G. Curti, AL Geraci, A. Risitano, *Ingegneria Automotoristica*, 42 (1989), 634.
- [3] G. La Rosa, A. Risitano, *Int J Fatigue*, 22 (2000), 65.
- [4] A. Risitano, G. Risitano, *Theor Appl Fract Mec*, 54 (2010), 82.
- [5] A. Risitano, G. Risitano, , *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, doi: 10.1002/ffe.12030, (2013) in press.
- [6] F. Curà, G. Curti, R. Sesana, *Int J Fatigue*, 27 (2005), 4, 453.
- [7] S. Giancane, A. Chrysochoos, V. Dattoma, B. Wattrisse, *Theor Appl Fract Mec*, 52 (2009), 117.
- [8] G. Meneghetti, *Int J Fatigue Int J Fatigue*, 29 (2007), 81.
- [9] G. Meneghetti, M. Ricotta, B. Atzori, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, (2013) in press.
- [10] KN. Smith, P. Watson, TH Topper, *J Mater*, 5 (1970) 767.
- [11] K. Walker, *ASTM STP 462*, (1970) 1.
- [12] A.K. Vasudevan, K. Sadananda, G. Glinka, *Int. J. Fatigue*, 23S (2001) S39.
- [13] D. Kujawski, *Int J Fatigue*, 23 (2001) 733.
- [14] D. Kujawski, *Int. J. Fatigue*, 23 (2001) S239.
- [15] S. Stoychev, D. Kujawski, *Int. J. Fatigue*, 27 (2005) 1425.
- [16] A. L. Audenino, L. Goglio, M. Rossetto, *Metodi sperimentali per la progettazione*, Levrotto&Bella, Torino, Italy (1997).
- [17] G. Meneghetti, M. Ricotta, L. Negrisolò, B. Atzori, In: *Proceedings of 12<sup>th</sup> Fracture and Damage Mechanics*, Alghero, Italy, (2013).
- [18] ASTM E112 - 12 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- [19] G. Meneghetti, M. Ricotta, *Eng Fract Mech*, 81 (2012) 2.