



Analisi termica per la valutazione del danno negli acciai

Antonino Risitano

Dipartimento d'Ingegneria Industriale e Meccanica, Università di Catania; Viale A. Doria 6, 95125 Catania, Italia
arisitan@diim.unict.it

Giacomo Risitano

Facoltà di Scienze e Tecnologie Applicate, Università degli Studi Guglielmo Marconi; Via Plinio 44, 00193 Roma, Italia;
g.risitano@unimarconi.it

RIASSUNTO. Sulla base di una metodologia consolidata, proposta in [26], per la definizione dell'intera curva di fatica di acciai mediante analisi termografica viene indicata una procedura per la valutazione del danno. Partendo dall'osservazione di base che ogni componente caricato dinamicamente, al di sopra del proprio limite di fatica, mostra un aumento di temperatura tanto più alto quanto più alto è il carico applicato, viene valutato il grado di danno in provini di acciaio. I risultati confrontati con quanto si ottiene applicando l'ipotesi del Miner mostrano da un lato la validità della stessa ipotesi, dall'altro evidenziano come la procedura, in modo semplice, si possa adottare come metodo non distruttivo per la valutazione dell'eventuale danno in componenti precedentemente usati.

ABSTRACT. Following the first damage models proposed by Palmgren and Miner, numerous researchers have focused on the problem of predicting the residual life of a material from its load history. Every component dynamically loaded, particularly over the fatigue limit, shows an increase in temperature. The higher the temperature the higher the load applied. Therefore in an undamaged material or mechanical component, it is possible to associate each loading stress over the fatigue limit with a temperature value at the hottest point of the surface during the first phase of the test through a thermo-mechanical characterization (TMC map). Using the thermoanalysis of steel specimen data, this paper shows that the energetic effect shows as a different temperature increments for equal loading uniaxial stress can be used to evaluate the cumulative damage caused by previous loading.

PAROLE CHIAVE. Fatica; Energia plastica; Termografia infrarossa; Caratterizzazione meccanica dell'acciaio.

INTRODUZIONE

La rottura per fatica di elementi meccanici si verifica perché spesso non è possibile prevedere la vita residua di un componente e quindi effettuare interventi tempestivi di manutenzione o sostituzione. Conoscere la vita residua di un componente in uso, permetterebbe, in primo luogo, di migliorare l'affidabilità del sistema, e sarebbe anche un buon indice per il riutilizzo di un componente, con conseguente vantaggio economico e ambientale.

I test non distruttivi (*Non-Destructive Testing* - NDT), compreso il monitoraggio continuo dei sistemi e di tutti i relativi elementi strutturali, offrono importanti vantaggi sia in termini scientifici e sociali, facilitando la valutazione dello stato dei componenti, consentendone l'eventuale sostituzione, qualora fosse necessaria. La termografia può essere utilizzata come un mezzo di rilevamento a distanza e a tutto campo, per valutare, anche durante il funzionamento, qualora il componente sia visibile, la presenza di un eventuale danno. Infatti, un componente per cui, precedentemente, è stata fatta una caratterizzazione termo meccanica (TMC) mediante il metodo indicato nel presente lavoro, può essere monitorato durante



la sua reale applicazione, per individuare eventuali inizi di micro plasticizzazioni che nel tempo possono portare a una rottura definitiva del componente stesso. Di fatti, la presenza di difetti con la messa in gioco di quote di energia irreversibile durante sollecitazioni variabili nel tempo, si manifesta all'esterno del componente come un incremento locale di temperatura.

Seguendo il primo modello di danno proposto da Palmgren [1] e Miner [2], nella letteratura scientifica vi sono molteplici modelli di analisi energetica sulla meccanica della frattura e sulla rottura per fatica [3]. Su questi modelli si basano i diversi metodi per la previsione del limite di fatica o di durata del componente. Negli ultimi anni, numerose ricerche hanno evidenziato la correlazione tra l'aumento della temperatura, sulla superficie del provino (componente meccanico), e la presenza, su scala locale, delle micro fratture indotte da carichi dinamici.

In particolare, F. Delorme J. et Al. [11] Dengel e Harig [12] Kaleta, et Al. [13] con metodologie di misura diverse, hanno studiato l'energia dissipata in un solido sottoposto alla fatica ciclica. Nel 1984 Caltabiano et Al. [14 e 15], hanno iniziato ad utilizzare l'analisi termografica per indagare sulla temperatura superficiale durante le prove di fatica. Essi hanno osservato che solo, per carichi al di sopra del limite di fatica il provino si riscaldava e che era possibile localizzare il punto in cui il campione si rompeva già dall'inizio dell'applicazione del carico. Sulla base dei risultati riportati nei riferimenti [14 e 15], Curti, Risitano et Al. [16 e 17] hanno proposto un nuovo metodo per la determinazione rapida del limite di fatica. La Rosa e Risitano [18] hanno successivamente proposto un metodo per determinare il limite di fatica con un numero molto limitato di provette (teoricamente solo una tre in applicazioni pratiche). Il provino veniva sollecitato con carichi progressivi a scalino (*step* di carico) dal più basso al più alto. L'analisi dei risultati per la determinazione del limite di fatica veniva effettuata nello stesso modo di Curti e Risitano [16]. Luong et Al. [19-22] usarono la termografia per misurare la temperatura della superficie e proposero un metodo simile a quello ideato da Curti e Risitano [16]. Luong ha mostrato che il limite di fatica coincide con la sollecitazione per la quale la curva di temperatura al variare del carico cambia bruscamente la sua pendenza. Blarasin et Al. [23] utilizzano un metodo simile a quello proposto da Curti e Risitano [16] hanno effettuato dei test direttamente su un componente meccanico (una biella). Cura et Al. [24] hanno proposto un nuovo metodo di iterazione come un miglioramento del metodo Luong per stimare il limite di fatica con maggiore precisione.

L'ipotesi che la rottura di un provino (o di un componente meccanico) per fatica si verifichi quando l'energia dissipata raggiunge un determinato valore E_l (Energia Limite), che è una costante indipendente dalle condizioni di carico, è stata proposta dalla Feltner e Morrow [25], confermata da J.F. Delorme [11], utilizzata da Kaleta et Al. [13] e da A. Risitano et Al. [26].

Partendo da questa ipotesi, nel 1997 Fargione et Al. [Catania 1997] [26] hanno proposto, per la prima volta, un nuovo metodo (metodo Risitano) per definire la curva di fatica (curva Wohler) di un materiale. Per mezzo del confronto dei dati sperimentali eseguiti in medesime condizioni (pari valore del rapporto di sollecitazione R e della frequenza di prova f), è stato verificato che, in prove di fatica, la rottura del materiale avviene per un valore costante del parametro energetico Φ e come E_s , esso rimane una costante indipendente dalle condizioni di carico. Il parametro Φ è l'integrale della temperatura del punto più caldo della superficie, durante tutta la prova ad alto numero di cicli. Esso è costante a parità di tutti gli altri parametri (frequenza e rapporto di carico) per storie di carico diverse. Questo permette per la prima volta di associare la temperatura di stabilizzazione ΔT_{2s} , relativa ad un dato carico massimo, al numero di cicli a cui avviene la rottura. Nel 2008 Walter F. e D. Eifler [27] hanno proposto un metodo accelerato per la determinazione della curva Wohler. Hanno usato una procedura simile a quella discussa nel riferimento [26] (*step* con diversi carichi), misurando la temperatura della superficie del provino insieme alla resistenza elettrica del provino stesso. Mediante l'equazione di Basquin, che è stata adattata per i parametri elettrici misurati, hanno calcolato la curva di fatica sia per un carico costante in ampiezza e sia per un carico comunque variabile.

Tutti i metodi citati sopra si basano sul fatto che in prove di fatica, da un punto di vista termico, l'effetto dissipativo interno della fase elastica è trascurabile in confronto agli effetti dissipativi associati al comportamento a fatica del materiale.

A. Risitano e Al. [29] hanno proposto un metodo per definire il limite di fatica in modo diretto dall'analisi termografica della superficie del provino durante la prova di trazione statica.

Sulla base delle ipotesi di Feltner e Morrow [25], Blonty e Kaleta hanno lavorato, sia su un modello matematico [30] che in via sperimentale [31, 32], sulla determinazione dell'energia accumulata nel materiale durante la prova di fatica, mediante il calcolo dell'energia termica liberata. Atzori et Al. [33,34] hanno studiato il rapporto tra l'ampiezza degli stress in prove di fatica, la cessione di calore e la vita a fatica. Meneghetti [36] ha definito un modello teorico, al fine di determinare la perdita di calore per ogni ciclo, misurando la temperatura superficiale, nel corso di prove a fatica. Plekhev et Al. [36] hanno sviluppato un modello termodinamico al fine di determinare la localizzazione della deformazione plastica nei metalli. Il modello consente di descrivere le quote di energia conservativa e la quota di dissipativa nella fase plastica. Klingbeil [37] lega la crescita della cricca per fatica con l'energia totale plastica dissipata per ogni ciclo ottenuta attraverso



una simulazione elastoplastica agli elementi finiti dei test di fatica. Boulanger et Al. [38] utilizzano l'analisi calorimetrica per stimare la parte di energia termoelastica e la parte dissipativa durante le prove di fatica di un provino in acciaio. Ranc et Al. [39] hanno studiato la propagazione della cricca in un regime a fatica ad altissimo numero di cicli (*gigacycles fatigue*) sviluppando un modello termomeccanico. Essi hanno osservato, con l'analisi a raggi infrarossi, che la fase di propagazione della cricca costituisce solo una piccola parte della vita del provino. Selek et Al. [40] hanno studiato l'inizio della formazione della cricca tramite reti neurali artificiali utilizzando i profili termografici di temperatura dell'AISI 37. Lazzarin et Al. [41] hanno studiato la densità di energia locale in un giunto saldato e hanno valutato, in forma chiusa, il valore dell'energia di deformazione media su un volume di controllo ben definito. Chrysochoos et Al. [42] mediante processo di immagini all'infrarosso analizzarono l'effetto di deformazioni plastiche localizzate.

La ricca letteratura mette in evidenza come l'energia dissipativa caratteristica dell'inizio di rotture per fatica possa essere usata come elemento indicativo dello stato di danno.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di sviluppare una metodologia per la valutazione del danno di un materiale, o di un componente strutturale, tramite un'adeguata analisi termografica, anche nel caso in cui la storia di carico non è nota.

Come detto in precedenza, durante le prove di fatica ad alto numero di cicli, la variazione di energia per isteresi elastica è piccola rispetto all'energia dissipata sotto forma di calore; di conseguenza l'aumento della temperatura sulla superficie del provino viene interpretata come indice dell'effetto dell'energia interna dissipata alla fine della fase termoelastica (inizio della microfrattura per fatica) in una determinata zona del provino. Nel presente lavoro, gli autori propongono una procedura per valutare il danno causato dai carichi agenti precedentemente con possibilità, quindi, di prevedere la restante vita residua. Per raggiungere l'obiettivo, nella prima fase, hanno caratterizzato il comportamento a fatica di ogni provino in acciaio in esame con il metodo Risitano. Nella seconda fase, hanno ridefinito le curve di fatica di provini uguali, ma precedentemente danneggiati, al fine di stimare il danno e, pertanto, valutare la restante vita residua. Infine, per i provini danneggiati è stata verificata la teoria del Miner.

Dato che non richiede frequenze di carico elevate, la procedura basata sul metodo Risitano può essere usata direttamente sui componenti di un sistema. Ciò lo rende particolarmente adatto per i prototipi, in modo che, se necessario, la progettazione di un componente può essere guidata al fine di garantire una maggiore resistenza meccanica prima dell'inizio dell'entrata in produzione.

Questo studio, che è il primo passo di un più ampio programma, si propone di valutare la vita residua di provini anche quando la storia di carico è sconosciuta.

STATO DELL'ARTE

La prima teoria idonea a descrivere i danni, sviluppata da Palmgren [1] nel 1924, è stata successivamente tradotta in forma matematica da Miner [2] nel 1945. L'approccio si basa sul presupposto che il danno prodotto da carichi di diverso valore può essere sommato in modo lineare. L'ipotesi di Palmgren presuppone che ogni ciclo di carico dissipa una certa quota di energia; ma, dato che per ogni materiale vi è un valore caratteristico di energia che può essere dissipata prima della rottura, ogni ciclo consuma una parte della vita residua del materiale stesso [17, 21]. E' noto che la rappresentazione di Miner della teoria di Palmgren è espressa da (1):

$$D = \sum r_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

Dove n_i è l'attuale numero di cicli e N_i è il numero di cicli alla rottura all' i -esimo carico. La misura del danno è semplicemente il rapporto del numero di cicli n_i e N_i , con l'assunzione di base che l'energia dissipata per ogni ciclo di carico è costante e che, per ciascun materiale, si dissipa una determinata quantità di energia per raggiungere la rottura. Si considera che la rottura si verifica quando $\sum r_i = 1$, dove r_i è inteso come il rapporto tra numero di cicli corrispondente al relativo livello di carico.

Come precedentemente detto, partendo dall'ipotesi di Feltner e Morrow (nella pratica simile a quella del Miner) secondo cui la rottura del materiale si verifica quando l'energia dissipata raggiunge un valore E_l (energia limite), che è una costante indipendente dalle condizioni di carico, il metodo Risitano si è dimostrato efficace nel determinare il limite di fatica dei materiali e delle loro corrispondenti curve di Wöhler [18, 26].

Il metodo parte dalle seguenti osservazioni:

1. se la tensione applicata è inferiore al limite di fatica, il provino, in pratica, non presenta alcun riscaldamento superficiale e la variazione di temperatura sulla superficie del provino rispetto alla temperatura dell'ambiente ΔT_2 (Fig. 1) è praticamente uguale a zero al variare del numero di cicli;

2. la variazione di energia per isteresi elastica è molto piccola rispetto all'energia dissipata sotto forma di calore per effetto di deformazioni irreversibili, di conseguenza, l'aumento della temperatura sulla superficie del provino può essere vista come diretta conseguenza della quota di energia irreversibile (E_i) trasformata in calore.
3. per valori di tensione σ_i superiore al limite di fatica, la variazione di temperatura superficiale ΔT_{2i} di stabilizzazione (Fig. 2) di un punto di un provino (o di un componente meccanico) e la tensione stessa, sono fra di esse legate. In particolare, a parità di frequenza f e rapporto di carico R , ΔT_{2i} è tanto più elevata, quanto maggiore è la σ applicata;

4. il parametro energetico $\Phi = \int_0^{N_f} \Delta T dN$ (proporzionale alla quantità di calore Q generata per gli effetti irreversibili)

al pari di E_i , è una costante del materiale. In esso ΔT rappresenta la variazione di temperatura rispetto alla temperatura ambiente del punto più caldo della superficie del provino durante tutta la prova (fino alla rottura). La rottura del materiale, a parità di frequenza f e rapporto di carico R , può essere raggiunta o con carico costante al di sopra del limite di fatica o con *step* successivi di carico (Fig. 3);

5. il raggiungimento della rottura mediante carichi a scalino permette di tracciare la curva di Wöhler in via teorica con un solo provino (nella pratica applicazione si usano tre provini) in quanto è possibile, nello stesso tempo, associare ad ogni carico σ_i la variazione di temperatura ΔT_{2i} (circa costante fino al numero di cicli N_r di rottura) ed è possibile definire il parametro Φ (per acciai, anche esso, circa uguale a $\Delta T_{2i} \cdot N_f$).

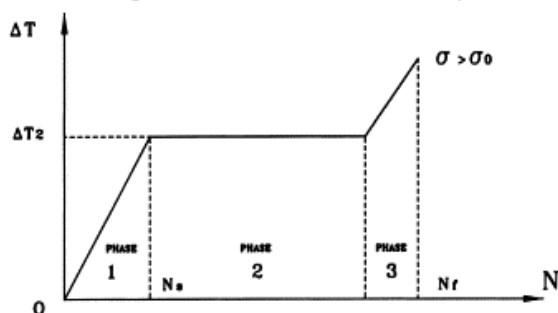


Figura 1: Incremento qualitative delle temperature in funzione del numero di cicli per una tensione sopra il limite di fatica $\Delta\sigma_0$.

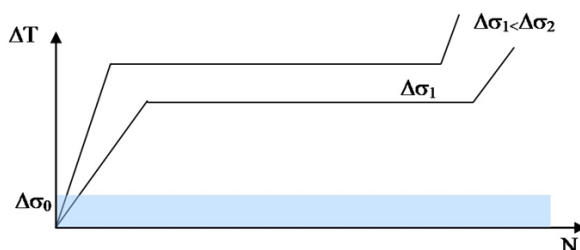


Figura 2: Incremento qualitative delle temperature ΔT per tensioni sopra al limite di fatica $\Delta\sigma_0 < \Delta\sigma_1 < \Delta\sigma_2 < \Delta\sigma_3$.

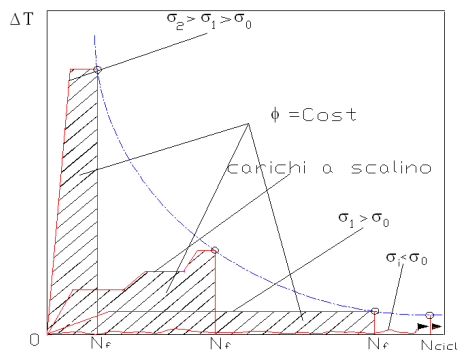


Figura 3: Incremento qualitative di temperatura ΔT and parametro energetico $\Phi = \int_0^{N_f} \Delta T dN$

per tensioni sopra al limite di fatica $\sigma_0 < \sigma_1 < \sigma_2$.



Per ragioni di brevità, si rimanda a [18, 26] in cui il metodo è descritto in modo dettagliato e sperimentalmente verificato. In relazione al presente lavoro si può dire che, se un provino danneggiato è sottoposto ad una sollecitazione pari al limite di fatica, esso presenterà una variazione di temperatura diversa dallo zero e, più in generale, la sua mappa termica (TMC), in medesime condizioni di sollecitazione (stessa frequenza f , stesso rapporto di carico R , stessi *step* di carico) è diversa da quella di un provino integro.

Basandosi sulle osservazioni prima riportate e sul metodo prima richiamato, nel presente lavoro, dopo aver caratterizzato il materiale mediante la costruzione di una mappa termica (TMC), si definiscono le nuove mappe termiche e le relative curve di Wöhler per provini diversamente danneggiati e, di conseguenza, la corrispondente vita residua. Una verifica sulla validità del parametro Φ viene eseguita tracciando le curve dei provini danneggiati secondo l'ipotesi del Miner e verificando, per gli stessi provini, la localizzazione dei punti ricavati (secondo Risitano) attraverso l'utilizzo del parametro Φ .

PROCEDURA SPERIMENTALE E ANALISI DEI RISULTATI

Le prove sono state condotte su provini in acciaio C40 per il quale altri autori (Berto e Lazzarin [4]) avevano, con metodo tradizionale, ricavato le curve di Wöhler. La composizione dell'acciaio è quella riportata in Tab. 1. Sul materiale sono state eseguite prove statiche di trazione e i dati sono riportati in Tab. 2. La forma e le dimensioni dei provini usati per le prove di fatica sono riportate in Fig. 4. La macchina di prova a fatica era la *Instron® 8500* con cella di carico da 100 kN. Durante le prove di fatica mediante il termografo *Agema Thermovision 900 con Thermovision 900 SW/TE* scanner, veniva rilevata e registrata la temperatura superficiale di ciascun provino, opportunamente in precedenza rivestiti di vernice nera (è stata assunta un'emissività ε pari a 0.9). Le prove di fatica sono state condotte con rapporto di carico R pari a -1 e con due frequenze f diverse (10 Hz e 20 Hz). Per ciascuna frequenza i provini testati erano in numero di tre.

	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
C40	0.4	< 0.8	< 0.35	-	-	-	-	-	-

Tabella 1: Composizione chimica dell'acciaio C40 [% Peso]

	ULTIMATE STRENGTH σ_R [MPa]	YIELD STRENGTH σ_s [MPa]	fatigue limit σ_0 (R=-1) [MPa]
C40	660.00	510.00	251.8 by [3]

Tabella 2: Comportamento meccanico dell'acciaio C40.

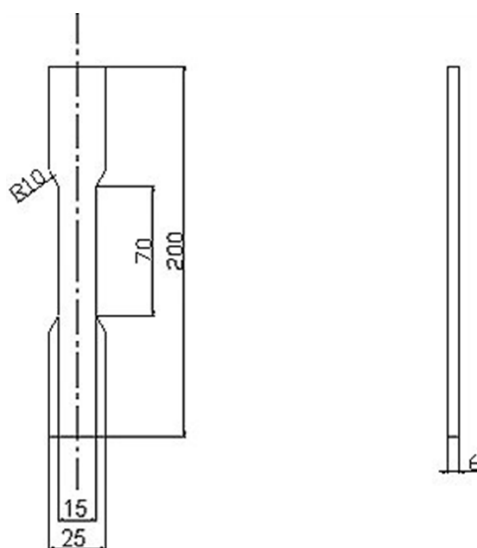


Figura 4: Dimensioni geometriche del provino (mm).



In Tab. 3 sono riportati i valori della sollecitazione massima per ciascun *step* di carico a cui veniva sottoposto ciascun provino.

S [kN]	σ [MPa]
14	155.55
17	188.89
20	222.22
22	255.55
24	266.67
26	288.89
28	311.10

Tabella 3: Valore dei carichi applicati.

Le prove sono state condotte in due successive fasi. In una prima fase tre provini per ciascun valore di frequenza (10 e 20 Hz) venivano sottoposti a carichi a scalino (10.000 cicli per scalino), secondo il diagramma di Fig. 5, fino a portarli a rottura. Per ciascuno di essi veniva rilevata e registrata la temperatura dell'intera superficie del provino. Successivamente, veniva caratterizzato (mappa TMC) ciascun provino, riportando in diagramma la variazione $\Delta T = T - T_0$ (alla temperatura del punto scelto viene sottratta la temperatura del provino all'inizio della prova) del punto (zona) piú caldo della superficie del provino in funzione del numero di cicli. Operando con sottrazioni di temperatura le mappe termiche risultano sempre indipendenti dalla temperatura ambiente. La Fig. 7, per ragioni di chiarezza, riporta le mappe TMC per uno solo dei tre provini provati a 10 Hz (Fig. 7) e per uno dei tre provati a 20 Hz (Fig. 8) in quanto esse risultavano, dal punto di vista dell'analisi, praticamente identici e sovrapponibili. Avendo portato a rottura i provini, è stato possibile determinare il parametro $\Phi = \int_0^{N_f} T dN$. Di conseguenza alla fine della prima fase (primo *stage* di prove) si era in grado di determinare il limite di fatica e la curva di Wöhler dei provini integri per le due condizioni di frequenza.

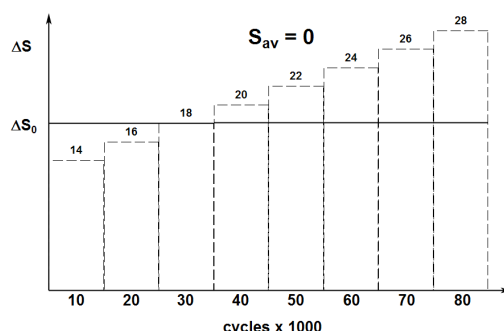


Figure 5: Incremento continuativo della tensione usato per la mappa MTC durante il primo *stage* di prove.

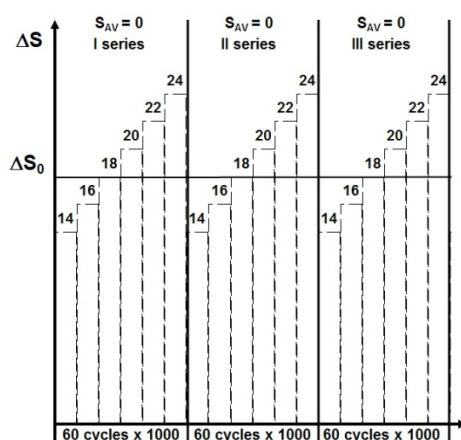


Figura 6: Successione degli *step* di carico usati durante il secondo *stage* di prove.

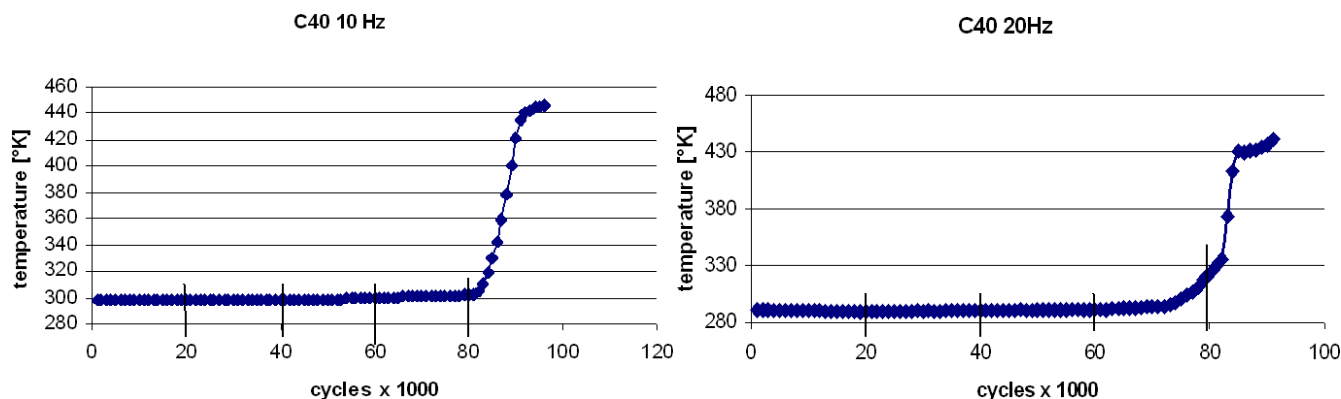


Figura 7: Incrementi di temperature T in funzione dei numeri di cicli per l'acciaio C40 con frequenze di prova di 10 e 20 Hz.

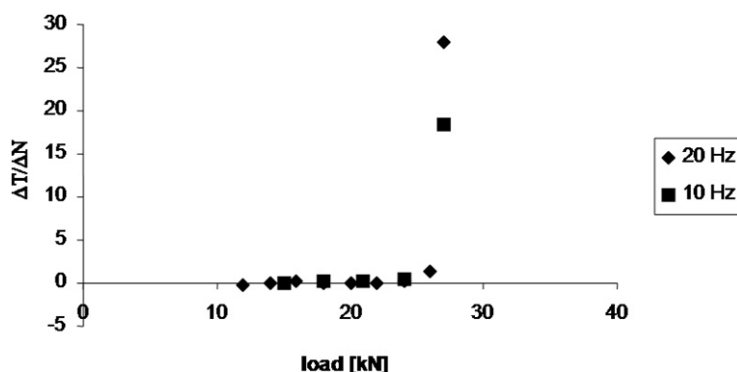


Figura 8: Determinazione del limite di fatica $\Delta\sigma_0=S_0/A$ con il metodo Risitano.

Nella seconda fase (secondo *stage*) delle prove, sono stati usati provini identici (uguale materiale, uguale geometria, etc.) a quelli della fase precedente ed, in modo analogo a quanto fatto precedentemente, sono state applicate, a ciascuno provino, tre serie (I, II, III) di carico con le due frequenze (10 e 20 Hz). Una rappresentazione qualitativa di tutto ciò la si può vedere nella Fig. 6. In questa seconda fase, si è avuta la cura di interrompere gli ultimi *step*, rispetto alla fase precedente, a livelli di carico più bassi, in modo da creare del danno con le serie I e II, e rottura solo con la serie finale III. Come per i provini della prima fase, la temperatura dell'intera superficie del provino veniva acquisita e registrata fino alla rottura (serie di carico III) ed, nella fase successiva di post-processing, come si era fatto per i provini della prima fase, venivano costruite per l'intera prova (I, II, III serie) le mappe TMC, seguendo l'evoluzione del punto più caldo della superficie. Alla

fine della seconda fase si otteneva, per tutti i provini, il limite di fatica, la curva di Wöhler ed il parametro $\Phi = \int_0^{N_f} \Delta T dN$. Si

è stati in grado di determinate i valori del parametro Φ (Φ_I , Φ_{II} , Φ_{III}) per le tre distinte serie di carico. I dati riportati, così come le curve, si riferiscono, per ciascuna tipologia di prova, sempre ai valori di uno dei tre provini, in quanto i valori di temperatura rilevati erano fra loro molto simili e ai fini della elaborazione praticamente uguali.

RISULTATI E COMMENTI

Le Fig. da 7 a 10 si riferiscono alle prove della prima fase (provini integri).

In particolare la Fig. 7 riporta, per le due frequenze di prova, le curve rappresentanti i TMC dei provini integri. La Fig. 8 riporta i dati per la determinazione del limite di fatica che è risultato pari a 258.60 MPa per f uguale a 10 Hz e 248.20 MPa per f uguale a 20 Hz. I suddetti valori sono anche riportati in Tab. 4. I valori trovati sono coincidenti con quelli determinati con metodo tradizionale da Berto e Lazzarin. Il valore del parametro Φ è risultato pari a $110 \cdot 10^4$ [kcipli*°C] a 10 Hz e $114 \cdot 10^4$ [kcipli*°C] a 20 Hz. Noti i valori di Φ e le mappe termiche TMC, è stato possibile, mediante il metodo Risitano [26], definire i punti della curva di Wöhler. Nelle Fig. 9 e 10, rispettivamente per le frequenze di 10 Hz e 20 Hz, sono riportati i punti trovati attraverso il TMC (cerchietti pieni) e i punti ricavati da Berto & Lazzarin

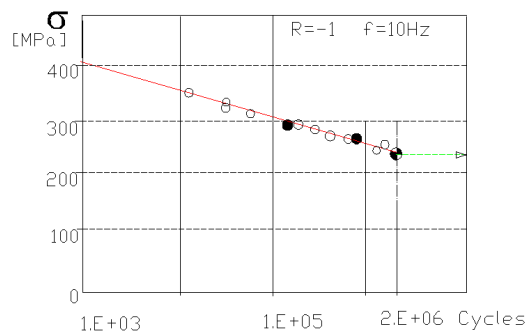


[4] con il metodo tradizionale (cerchietti vuoti).

Le Fig. da 11 a 13 si riferiscono alle prove della seconda fase (provini danneggiati).

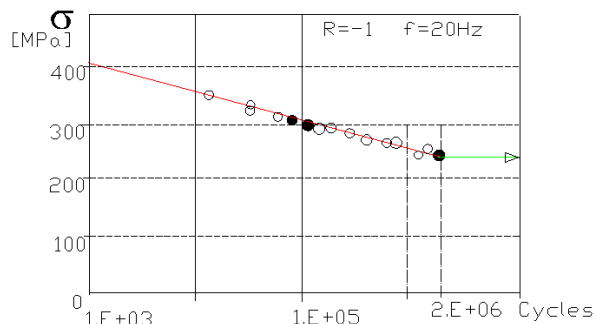
f [Hz]	S_0 [kN]	σ_0 [MPa]
10	24.2	258.60
20	22.5	248.20

Tabella 4: Carichi corrispondenti al limite di fatica per l'acciaio C40 tramite TMC.



Traditional method \circ (by [3])
Risitano method \bullet

Figura 9: Curva di Wöhler creata tramite il metodo tradizionale e quello termografico con una frequenza di prova di 10 Hz.



Traditional method \circ (by [3])
Risitano method \bullet

Figura 10: Curva di Wöhler creata tramite il metodo tradizionale e quello termografico con una frequenza di prova di 20 Hz.

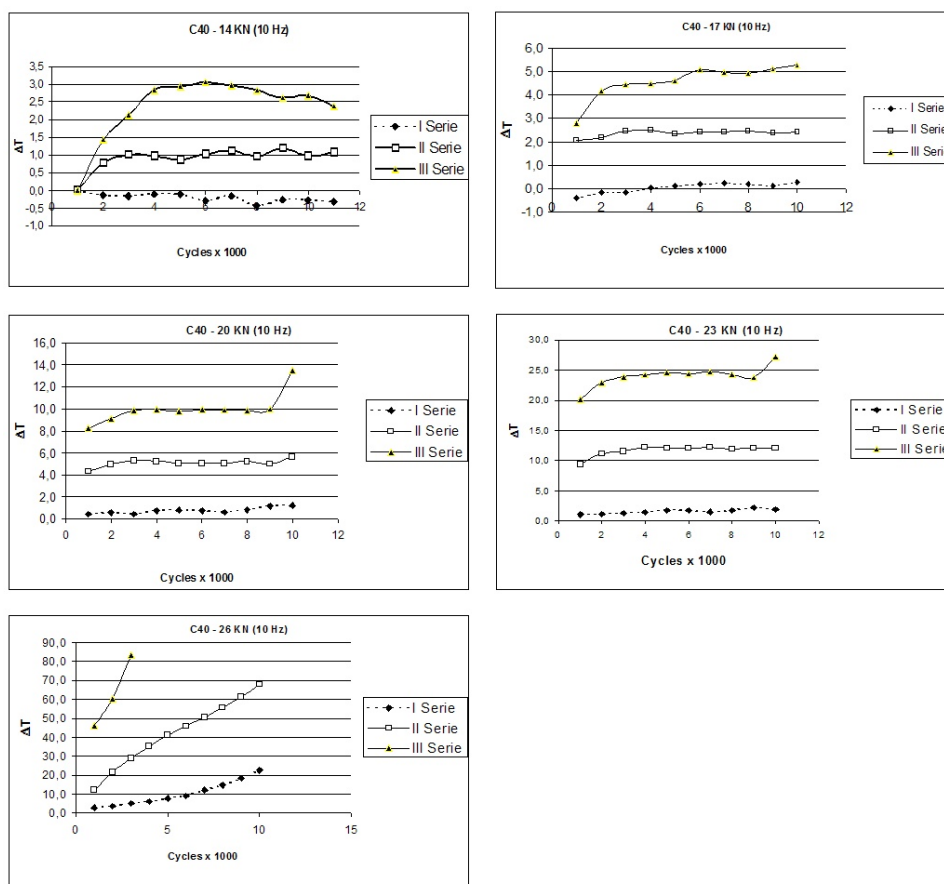


Figura 11: Andamenti del ΔT di temperature in funzione del numero di cicli con una frequenza di carico di 10 Hz per differenti serie (I, II, III).



In particolare la Fig. 11 riporta le curve relative alle tre serie raggruppate per valori di livelli di carico, applicati per frequenza pari a 10 Hz. Analoghe curve qui non riportate, per ragioni di brevità, sono state costruite per i provini testati a 20 Hz. L'analisi delle curve così raggruppate mette meglio in evidenza che per le serie successive, a parità di carico applicato, la temperatura è sempre più elevata di quella della serie precedente. In particolare, le temperature rilevate per la prima serie (provini ancora non danneggiati) sono praticamente coincidenti con quelle rilevate nella prima fase per i provini integri. L'analisi termica della superficie dei provini ha evidenziato che il punto più caldo rimaneva sempre lo stesso sin dall'inizio della prova e che si manteneva tale nell'applicazione delle diverse serie fino alla rottura del provino. La Fig. 12a (TMC), riporta in modo diverso quanto rappresentato nella Fig. 11. E' importante notare che, con l'applicazione della prima serie di carichi, il primo incremento di temperatura appariva solo per carichi superiore al limite di fatica dei provini integri; mentre, con le serie successive (provini già danneggiati), si leggevano incrementi di temperatura già con l'applicazione dei carichi più bassi. Gli incrementi, già per questo livello di carico (14 kN), erano sensibilmente diversi per le due serie (II e III serie). Tale fenomeno diventava sempre più marcato per livelli di carico più elevati. Come precedentemente detto, identico risultato si aveva per le prove eseguite a 20 Hz.

Nella Fig. 12b sono riportate le curve di Wöhler a confronto. In particolare, per la frequenza di 10 Hz, nella figura, in aggiunta alla curva di Wöhler definita con metodo tradizionale da Berto & Lazzarin [4], sono riportate le curve, definite mediante il metodo Risitano, dei provini non danneggiati (serie I) e diversamente danneggiati (dopo applicazione della serie II di carichi e dopo applicazione della serie III di carico). I punti (in nero) sono praticamente coincidenti con quelli di Fig. 9 (provini ancora non danneggiati). I punti in giallo sono quelli relativi ai provini danneggiati per l'applicazione della serie I di carichi. I punti in blu quelli relativi agli stessi provini sottoposti alla serie I e II di carichi. Nella stessa figura sono riportate le corrispondenti curve (tratteggiate) ottenute applicando l'ipotesi del Miner ai provini danneggiati ai due livelli (serie I e serie I e II) dei quali, mediante il metodo termografico, era stato determinato il limite di fatica e per i quali era noto il carico di snervamento del materiale. L'esame della figura evidenzia la traslazione verso il basso delle curve per i due gradi di danno e mostra i punti relativi ai provini danneggiati perfettamente posizionati sulle curve di Miner per i rispettivi gradi di danno confermando, ancora una volta, la validità del parametro Φ anche come parametro indicatore dell'energia consumata per effetto di sollecitazioni al di sopra del limite di fatica e, di conseguenza, come indice del grado di danno.

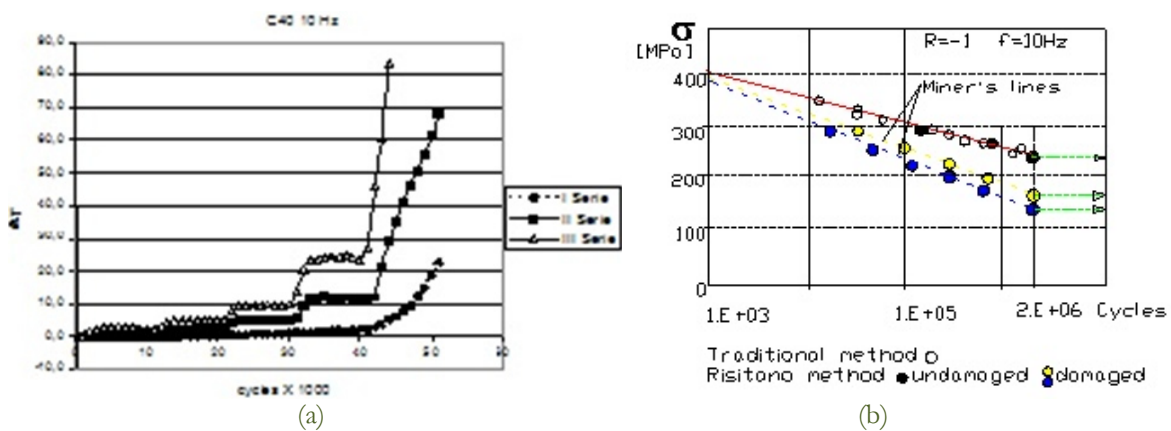


Figura 12: Incremento di temperatura T in funzione del numero di cicli (a) Curve di Wöhler e linee costruite con l'ipotesi del Miner (b) per acciai C40 a 10 Hz come frequenza di prova per differenti serie (I, II, III).

Con lo stesso criterio adottato per i dati di Fig. 12, in Fig. 13 sono riportati i risultati per la frequenza di prova di 20 Hz. Quanto precedentemente detto si può evincere anche dalla Tab. 5. In essa sono riportate, per le due frequenze di prova, i valori del parametro Φ (Φ_I , Φ_{II} , Φ_{III}) relative all'applicazione delle tre serie di carichi. Nella stessa tabella sono riportati anche i valori del grado di danno (D_I , D_{II} , D_{III}) come rapporto fra il parametro di energia consumata (Φ_I , $\Phi_I + \Phi_{II}$), relativo all'applicazione della storia di carico precedente, e il valore limite $\Phi = \Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III}$.

Dal punto di vista di una pratica applicazione di quanto precedentemente detto, si può evidenziare che per componenti meccanici in esercizio, se è nota la curva di Wöhler (o meglio ancora, se è stata fatta in sede di produzione una caratterizzazione termo-meccanica del componente) ed è nota la storia di carico, la vita residua del componente si può valutare mediante l'ipotesi del Miner direttamente.

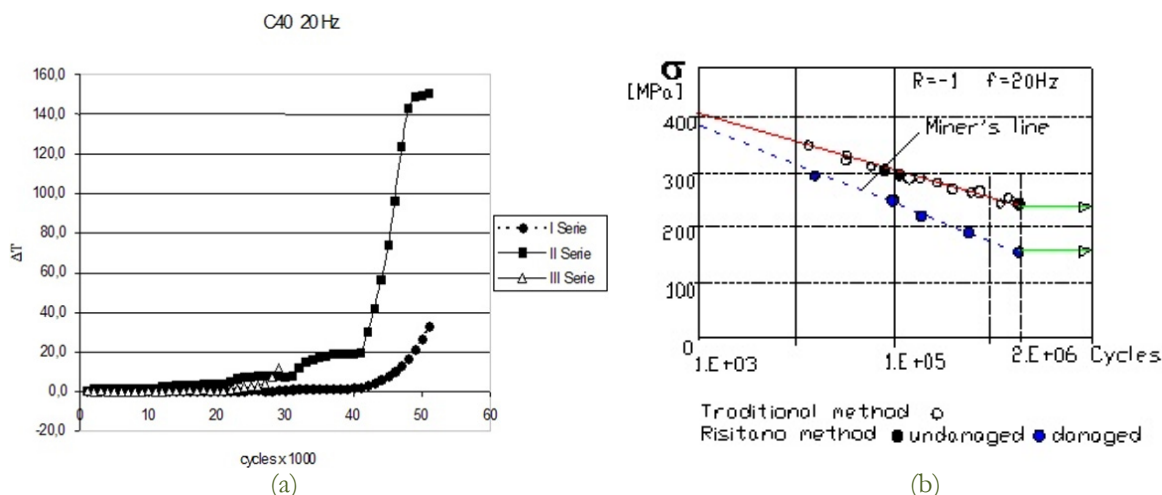


Figura 13: Incremento di temperatura T in funzione del numero di cicli (a) Curve di Wöhler e linee costruite con l'ipotesi del Miner (b) per acciai C40 a 20 Hz come frequenza di prova per differenti serie (I, II, III).

$R = -1$	$f = 10 \text{ Hz}$	$f = 20 \text{ Hz}$
Φ_I	$12.2 \cdot 10^4$	$15 \cdot 10^4$
Φ_{II}	$49.6 \cdot 10^4$	$65 \cdot 10^4$
Φ_{III}	$52.7 \cdot 10^4$	$30 \cdot 10^4$
Φ	$114.5 \cdot 10^4$	$110 \cdot 10^4$
D_I	0.106	0.136
D_{II}	0.540	0.636
D_{III}	1.00	1.00

Tabella 5: Parametro energetico Φ e indice cumulativo di danno D_i .

Per componenti meccanici di una stessa produzione, per cui è stata fatta in sede di produzione una caratterizzazione TMC (mappe termiche di carico per tre componenti del lotto con curve di fatica) e per cui non è nota la storia di carico è possibile ancora valutare il grado di danno e corrispondentemente la vita residua. Infatti, se in nessun punto, applicando al componente le stesse condizioni di prova adottate per il TMC (stesso rapporto di carico R , stessa frequenza f , stessa area superficiale osservata) con valori di carico pari al limite di fatica, la variazione $\Delta T = T - T_0$ di temperatura superficiale è diversa da 0, il componente non è danneggiato; se viceversa la temperatura superficiale, in qualche punto, è diversa da 0, il componente è danneggiato. In tal caso, il nuovo limite di fatica, in modo semplice, può essere determinato mediante analisi termografica, ovvero applicando carichi inferiori a quello per cui si è osservato l'incremento di temperatura e determinando quel carico per cui non si ha aumento di temperatura o anche utilizzando il metodo descritto in [30]. La vita residua a questo punto può essere valutata adottando l'ipotesi del Miner, ovvero tracciando nel diagramma semi-logaritmico la nuova curva di fatica come la retta che congiunge il nuovo valore del limite di fatica a $N = 2 \cdot 10^6$ cicli con il valore della tensione di snervamento a $N = 0$. Usata, come prima detto, la metodologia proposta può essere considerata come una metodologia non distruttiva (NDT), essendo i carichi sempre applicati per tempi limitati e molto prossimi al limite di fatica.

CONCLUSIONI

Con questo lavoro si propone un nuovo metodo per la valutazione del danno negli acciai, o in componenti meccanici, basato sul metodo Risitano [18, 26]. Dalla valutazione del parametro Φ (integrale della curva temperatura del punto più caldo della superficie del provino sotto carichi di fatica nel tempo) è possibile avere indicazioni sul grado di danno prodotto da precedenti carichi affaticanti.

Nel presente lavoro, i risultati dell'analisi della temperatura della superficie di provini precedentemente danneggiati, rilevata mediante sensore all'infrarosso termico, evidenziano quanto segue:



1. un provino (componente meccanico) integro sollecitato a tensione pari al limite di fatica non presenta incrementi di temperatura. $\Delta T = 0$ è il valore caratteristico che definisce il limite di fatica di un provino integro. Di conseguenza un provino (componente meccanico) che sollecitato ad una tensione pari al limite di fatica presenta incrementi di temperatura ΔT diversi da 0 è danneggiato;
2. il parametro Φ proposto da Risitano, facile da determinare, risulta adeguato a rappresentare il valore dell'energia limite a rottura E_f indicata in [25] da Feltner e Morrow come una costante caratteristica del materiale;
3. le prove eseguite con applicazione di carichi al di sopra del limite di fatica, in modo da danneggiare i provini, hanno evidenziato che il grado di danno, attraverso l'analisi dell'incremento di temperatura superficiale del provino, è coincidente con quello valutabile mediante l'applicazione dell'ipotesi del Miner. In particolare le curve di Wöhler, definite mediante l'utilizzo del parametro Φ , risultano perfettamente coincidenti con quelle determinate mediante l'applicazione dell'ipotesi del Miner;
4. la nuova curva di Wöhler, per provini (componenti) danneggiati di cui si conosce la storia di carico, può essere definita determinando per gli stessi il limite di fatica mediante metodo termografico (Risitano, Luong, Curti, etc.) e applicando l'ipotesi del Miner;
5. per provini o componenti meccanici per cui è stata fatta all'inizio (in fase di produzione) una caratterizzazione TMC (mappa termica in funzione dei carichi applicati) è possibile rilevare l'eventuale danno dopo (durante) l'utilizzo, mediante confronto fra il TMC iniziale ed il TMC dopo (durante) l'uso stesso. Il grado di danno, e la conseguente vita residua, possono essere definiti costruendo le nuove curve secondo Miner, una volta trovato con metodo semplice il nuovo limite di fatica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Palmgren, *Verfahrenstechnik*, Berlin, 68 (1924) 339.
- [2] M. A. Miner, *J. of Applied Mechanics*, 67A (1945) 159.
- [3] G. C. Sih, *Multiscale fatigue crack initiation and propagation of engineering materials, Structural integrity and microstructural worthiness: solid mathematics and its applications*, Springer, 152 (2008).
- [4] F. Berto, P. Lazzarin, *La Metallurgia Italiana*, 3 (2005) 23.
- [5] L. Locati, *Metall. ItAl.*, 27 (1935) 188.
- [6] Locati L., *Eng. Dig.*, 20 (1959) 337.
- [7] M. Prot, *Misure et control*, 13 (1948) 301.
- [8] M. Prot, *The Fatigue testing under progressive loading*, WADCTR (1952) 53.
- [9] O. Föppl, *V.D.I.Z.*, 70 (39) (1926) 1291.
- [10] O. Föppl, P. Ludwik, *V.D.I.Z.*, 76 (14) (1932) 683.
- [11] J.F. Delorme, G. Sinicki, P. Gobin, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1 (1968) 1737.
- [12] D. Dengel, H. Harig, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 3 (1980) 113.
- [13] J. Kaleta, R. Blotny, H. Harig, *J. Test Eval.*, 19 (1990) 326.
- [14] T. Catalbiano, A. Geraci, M. Orlando, *Il Progettista Industriale*, (1984) 2.
- [15] A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano, In: *CRES Symposium*, Catania Italy, (1984), published in *ATA Ingegneria Automotoristica*, 38 (1985) 8.
- [16] G. Curti, G. La Rosa, M. Orlando, A. Risitano, In: *14th AIAS Italian National Conference*, Catania, Italy, (1986) 211.
- [17] G. Curti, A. Geraci, A. Risitano, *ATA Ingegneria Automotoristica*, 10 (1989) 634.
- [18] G. La Rosa, A. Risitano, *Int. J. of Fatigue*, 22 (2000) 65.
- [19] M. P. Luong, *Mech. Mater.*, 28 (1988) 155.
- [20] M. P. Luong, *SPIE* 1682, (1992) 222.
- [21] M. P. Luong, K. Dang-Van, *Atti della fondazione G. Ronchi*, anno IL (1993).
- [22] M. P. Luong, *Nucl Eng Des*, 158 (1995) 363.
- [23] A. Blarasin, R. Fracchia, M. Pozzati, *ATA – Ingegneria Automotoristica*, 51(5) (1988) 255.
- [24] F. Curà, G. Curti, R. Sesana, *Int. J. Fatigue*, 27 (2005) 453.
- [25] C. E. Feltner, J. D. Morrow, *Trans. ASME, Ser. D: J. Basic Eng.*, 83 (1961) 15.
- [26] G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano, *Int. J. of Fatigue*, 24 (2002) 11.
- [27] F. Walter, D. Eifler, *J. of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2 (4) (2008).
- [28] A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano, In: *7th International conference on mechanical behaviour of material*, The Hague, (1995).



- [29] A. Risitano, G. Risitano, In: *Progettazione a Fatica di Giunzioni Saldate (...e non) - Sviluppi teorici e problemi applicativi*, Workshop IGF (Gruppo Italiano Frattura), Forni di Sopra (UD), (2009); pubblicato su: *Frattura ed Integrità Strutturale*, 9 (2009) 123.
- [30] R. Blonty, J. Kaleta, *Analysis of Mathematical model of the Fatigue Energy Hypothesis as seen by identification theory*, PhD Thesis, Inst. of material Science and Appl. Mechanics, TU Wroclaw, Report No 199 (1978).
- [31] R. Blonty, J. Kaleta, *Int. J. of Fatigue*, 1 (1986) 35.
- [32] R. Blonty, J. Kaleta, In: *7th International Conference on fracture (ICF-7)*, Houston Tex., Pergamon Press, Oxford, (1989) 1195.
- [33] B. Atzori, E. Gasparini, G. Meneghetti, In: *30th AIAS national conference*, (2001) 367.
- [34] B. Atzori, G. Meneghetti, In: *5th International Conference on Low Cycle Fatigue*, Berlin, Germany (2003) 147.
- [35] G. Meneghetti, *Int. J. of Fatigue*, 29 (1) (2007) 81.
- [36] O. A. Plenkev, N. Saintier, T. Palinluc, S. V. Uranov, Naimark, *Material Science and Engineering*, 462(1-2) (2007) 367.
- [37] N. W. Klingbeil, *Int. J. Fatigue* 25, (2003) 117.
- [38] T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier, *Int. J. Fatigue*, 26 (2004) 221.
- [39] N. Ranc, D. Wagner, P. C. Paris, *Acta Materialia*, 56 (15) (2008) 4012.
- [40] M. Selek, Ö. S. Şahin, Ş. Kahramanli, In: *EUROCON 2007 The International Conference on "Computer as a Tool"*, Warsaw, (2007).
- [41] P. Lazzarin, P. Livieri, F. Berto, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (7) (2008) 1875.
- [42] A. Chrysochoos, H. Louche, *Int. J. of Engineering Science*, 38 (2000) 1759.
- [43] ASTM E 466-72 Standard practice for conducting constant amplitude axial test of metallic materials.

NOMENCLATURE

- A area della sezione del provino
 f frequenza di carico
 E_w energia applicata
 E_i energia interna
 E_l energia di rottura per unità di volume
 E_p energia ceduta per unità di volume e per ciclo
 n_i numero di cicli per il carico i -esimo
 N numero di cicli
 N_f numero di cicli totale per la rottura
 N_i numero di cicli totale per la rottura con il carico i -esimo
 N_r numero di cicli totale per la rottura per un componente già danneggiato con il carico i -esimo
 N_s numero di cicli totale necessario alla stabilizzazione delle temperatura
 Q energia convertita in calore
 R indice di carico
 r_i rapporto di cicli (n_i/N_i)
 D indice di danno (metodo Risitano)
 T temperature di un punto del provino [K]
 T_a temperatura ambiente [K]
 T_0 temperatura superficiale iniziale del provino (si suppone che $T_0 = T_a$) [K]
TMC caratterizzazione termomeccanica
 ΔT differenza di temperature al tempo t ed al tempo zero (temperatura ambiente)
 ΔT_0 differenza di temperature per isterisi elastica e rumore.
 ΔT_2 variazione di temperatura di stabilizzazione (fase 2)
 ΔT_{2i} variazione di temperatura di stabilizzazione (fase 2) per il carico i -esimo
 S carico massimo
 S_0 carico corrispondente a limite di fatica
 S_w carico medio
 $\sigma_w = S_w / A$ tensione media
 $\Delta \sigma = S / A$ massima tensione locale applicata al provino (componente meccanico)



$\Delta\sigma_0 = S_0 / A$ limite di fatica (resistenza $\geq 2 \times 10^6$ di cicli)

$\Delta\sigma_i = S_i / A$ massima tensione per il carico i-esimo ($\Delta\sigma_1 < \Delta\sigma_2 < \Delta\sigma_3 < \dots$)

Φ valore cumulative dell'incremento di temperature ΔT per unità di volume nel tempo nella zone di frattura (proporzionale all'energia limite E_l); $\Phi = \Phi_D + \Phi_r$

Φ_I valore cumulative dell'incremento di temperature ΔT nel tempo dell'i-esima fase (proporzionale all'energia persa)