



## L'importanza del “parametro energetico” temperatura per la caratterizzazione dinamica dei materiali

A. Risitano

*Università Degli Studi di Catania, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Via Andrea Doria, 6 – 95125 Catania, arisitan@diim.unict.it*

G. Risitano

*Università Telematica Guglielmo Marconi, Via Plinio, 44 – 00153 Roma.*

**RIASSUNTO.** Le esperienze maturate nel campo dell'analisi termica di materiali utilizzati nelle costruzioni meccaniche [1,2,3] hanno permesso di evidenziare come il rilievo della temperatura (terzo parametro) in prove statiche e dinamiche costituisca un indicatore molto importante ai fini della caratterizzazione dinamica del materiale.

Essendo il rilascio termico funzione dell'energia applicata per portare a rottura il materiale, il rilievo di parametri ad esso legati, induce a nuove ipotesi e definizioni di limiti di fatica e resistenza a tempo.

Mediante l'analisi termica è possibile valutare anche parametri correlabili con il valore limite di energia a rottura  $E_f$  del materiale.

In [4] era stato già messo in evidenza da A. Risitano e Altri che, in prove statiche di trazione, l'inizio della zona di prima plasticizzazione del materiale, in termini di tensione, era osservabile dalla curva di variazione di temperatura  $\Delta T$  con il procedere della prova. Nello stesso lavoro si evidenziava come la velocità di prova avesse poca influenza sui valori della variazione di temperatura specialmente durante la fase elastica.

Operando con sensori sempre più precisi e per obiettivi rivolti alla ricerca dell'energia limite a rottura è stato osservato dagli autori che il seguire la variazione della temperatura sulla superficie del provino, in prove statiche di trazione, permette di legare i classici valori di resistenza all'oscillazione  $\sigma_0$  con una “temperatura limite”  $T_0$  corrispondente all'inizio di andamenti non lineari della stessa.

In questa sede si evidenzia un modello di comportamento fisico del materiale durante le prove di trazione che giustifica, in modo semplice, la capacità di risalire, attraverso la conoscenza sperimentale del limite di comportamento termo-elastico, ai classici parametri di resistenza a fatica.

Viene riportato, a titolo di esempio, il risultato relativo a provini piatti forati in acciaio facenti parte di una serie utilizzati per altri scopi (formeranno oggetto di altra pubblicazione) con i quali anche mediante prova statica si è determinata la loro resistenza all'oscillazione.

**ABSTRACT.** Following their research, the authors remarked on the importance of the knowledge of the temperature for stressed material (mechanical component). They show as a temperature (third parameter) is an important parameter to characterise dynamically the material.

Being that the thermal release is a function of the applied energy that leads to the failure, the knowledge of parameters linked to energy leads to new hypothesis and definitions of fatigue limit and lifespan.

A thermal analysis permits one to evaluate parameters related to the amount of energy to failure of tested material.

In [4] A. Risitano and Others, had remarked that during a static traction test, the beginning of plastic behaviour (linked to applied stress) was definable by analysing of the correspondent temperature curve. In the same work, they remarked about the low influence of the test velocity.



Still working with high level temperature sensors, the authors observed that during static tests, the temperature variation of the surface specimen, permits to associated the lower dynamic fatigue limit  $\sigma_0$  to a “temperature limit”  $T_0$  coincident to the end of thermo-elastic phase.

In this case a qualitative physical model, able to give and justify the possibility to evaluate the classic fatigue limit by experimental knowledge of thermo-elastic behaviour is discussed.

As an example, the results of traction tests performed on two rectangular section specimens notched with one hole each, where the change of linearity was evident, are reported. The corresponding value of stress was coincident with the fatigue limit  $\sigma_0$  for  $R = -1$ , found by traditional method.

**KEYWORDS.** Energia, Termografia, Temperatura in prova di trazione, Fatica

## INTRODUZIONE

Per la caratterizzazione dei materiali o di componenti meccanici ci si è affidati da sempre a prove (statiche o dinamiche) nelle quali difficilmente si teneva conto di parametri energetici. Nella prova di resilienza il parametro di riferimento come è noto è l'energia.

Le attuali tecnologie di misure, combinati con adeguati sistemi di analisi di immagini, permettono di tener conto di un parametro che è legato all'energia in gioco del sistema, ovvero, le variazioni di temperatura del materiale sottoposto a carichi. Con i sistemi di rilievo a distanza e a tutto campo attuali è possibile rilevare la temperatura sulla superficie del provino durante tutta la prova ed analizzare successivamente l'andamento della stessa nei vari punti. L'analisi termica permette di evidenziare, già all'inizio delle prove (statiche o dinamiche), il punto della superficie del provino a temperatura più elevata che individua la zona dove la rottura successivamente si realizzerà. Ciò diventa importante per la previsione di rotture anche in componenti meccanici in esercizio per cui sia possibile il rilievo a distanza della temperatura superficiale. Negli ultimi 20 anni, sulla scia di quanto indicato già da Foppel, ed altri ricercatori dello stesso periodo, con lo sviluppo di sensori per il rilievo della temperatura a distanza e a tutto campo sempre più precisi, tanti ricercatori hanno utilizzato la conoscenza della temperatura sulla superficie del provino durante le prove, in particolare dinamiche, per proporre metodologie e procedure per determinare sperimentalmente il limite di fatica del materiale in modo rapido [1,2,3,15,20]. Tanti altri hanno proposto modelli analitici e numerici basati sull'energia necessaria a portare a rottura il materiale verificando i risultati con lo stato termico rilevabile sulla superficie esterna del provino o componente analizzato [12,22,27,28,31,32,33,35,38,41].

La vasta letteratura degli ultimi anni sull'argomento evidenzia il grande interesse dei ricercatori sull'aspetto energetico del processo di danno o cedimento del materiale ed evidenzia la necessità di strumenti di indagine sempre più evoluti.

## LA TEMPERATURA NEL CASO DI PROVE DI FATICA

Il prendere in considerazione la variazione di temperatura  $\Delta T$  (terzo parametro oltre i due classici tensione  $\sigma$  e numero di cicli  $N$ ) durante l'esecuzione di prove di fatica ha portato il gruppo di ricerca di A. Risitano [1,2,3,4,5,18] a verificare, mediante sensori a tutto campo che, per una data frequenza di prova e per un dato rapporto di sollecitazione  $R$ , la variazione della temperatura sulla superficie del provino, con il numero di cicli era funzione della sollecitazione massima applicata. Seguendo il punto più caldo (areola attorno), preso come riferimento sin dall'inizio della prova si notava che la temperatura (temperatura media) dopo un primo veloce incremento ( $N_i$ , qualche migliaio di cicli) si stabilizzava fino al cedimento del materiale con un veloce ultimo incremento finale ( $N_f$  ancora qualche migliaio di cicli) prima della completa rottura (Fig. 1). Su tale osservazione si sono basati diversi metodi per la determinazione del limite di fatica del materiale [1,2,3,6,16,17,21,26] che permettono di ridurre in modo drastico i tempi di prova. In pratica, si è passati da un sistema a due parametri (tensioni, numero di cicli) ad un sistema a tre parametri (tensioni, numero di cicli, temperatura) e la durata del componente o del materiale può essere vista in termini energetici come una funzione dell'energia limite  $E_l$  necessaria per raggiungimento della rottura del provino (di un componente meccanico).



Applicando il primo principio della termodinamica al sistema considerato chiuso, si può affermare che l'energia interna è data dalla differenza tra il lavoro fornito al sistema e il calore ceduto all'ambiente circostante. Nel nostro caso il lavoro  $W$  fornito al sistema è lavoro meccanico dato dalla somma di una componente elastica  $W^e$  e di una componente plastica  $W^p$ .

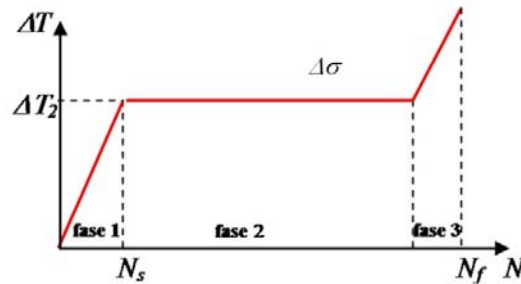


Figura 1: Andamento qualitativo della temperatura in un punto della superficie del provino durante una prova di fatica.

Le due componenti però contribuiscono termicamente a livelli differenti. Solitamente infatti le zone affette da plasticità vengono definite zone calde, e viceversa quelle soggette alla sola deformazione plastica sono definite fredde. In particolare il contributo della componente elastica è regolato dalla legge termoelastica che è inferiore a quello plastico. L'equilibrio globale tra l'energia meccanica fornita in termini elastici e plastici e il calore dissipato è dato dall'Eq. (1) di bilancio del calore:

$$\beta \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p + K \nabla^2 T + (3\lambda + 2\mu) \alpha T_0 \dot{\epsilon}^e = \rho c_e \dot{T} \quad (1)$$

dove  $K$  è la conduttività termica,  $\rho$  la densità,  $c_e$  il calore specifico,  $T$  la temperatura  $\beta$  è la frazione di potenza termica rilasciata sulla potenza meccanica trascurando la componente termoplastica,  $\lambda$  e  $\mu$  sono le costanti di Lamè,  $\alpha$  il coefficiente di dilatazione termica. La componente plastica del lavoro meccanico  $W^p$  coincide con l'area del ciclo, e può essere calcolata con la relazione (2):

$$W^p = \int_0^T \sigma d\epsilon^p \quad (2)$$

$\dot{W}^p$  è quindi pari al prodotto della componente deviatorica dello sforzo per l'incremento di deformazione plastica valutato su un ciclo.

Per i materiali comunemente adottati in campo meccanico, (acciaio e ghisa,)  $\beta$  (circa 0,9) si può considerare costante rispetto alle sollecitazioni ed alle deformazioni. Per le normali frequenze di prova, il sistema può essere considerato adiabatico, la componente termoelastica può essere trascurata; vale dunque la relazione (3):

$$\beta \dot{W} = \rho c_e \dot{T} \quad (3)$$

La temperatura raggiunta superficialmente, è dunque, sotto le condizioni suddette, direttamente correlabile all'energia meccanica di deformazione.

Nel caso di prove di fatica, quindi, l'energia liberata come calore che si va a mettere in relazione con gli altri due parametri (tensioni e tempo) diventa praticamente quella che si genera per effetto di micro-plasticizzazioni, ovvero, quella che si sviluppa allorché inizia il processo di cedimento del materiale essendo, in confronto a questa, molto piccola quella che si produce per effetto del classico fenomeno dello smorzamento interno (elastico) specialmente alle normali (minore di 50 Hz) frequenze di prova.

Sperimentalmente si osserva che operando con sollecitazione oscillante, l'incremento di temperatura sulla superficie esterna del provino, rilevabile con sensori all'infrarosso termico, si manifesta allorquando la sollecitazione applicata al materiale supera in un punto il limite di fatica ovvero allorquando, in quel punto, la tensione è tale da produrre le prime micro-plasticizzazioni (interne o superficiali) che con il progredire del tempo (numero di cicli), raggiunto il valore di energia necessario alla rottura  $E_l$  per quel dato componente, conducono al cedimento fisico dello stesso.

Si evince che quando la sollecitazione applicata è tale da produrre in un punto del materiale plasticizzazione locale, inizia il fenomeno di progressivo cedimento del materiale che nel tempo porterà alla rottura. Il valore di energia  $E_l$  "Energia limite" costituisce il limite energetico per quanto riguarda la resistenza a sollecitazioni di fatica. Il raggiungimento di tale

limite, conduce al cedimento del materiale che si può ottenere in infiniti modi diversi (storie di carico diverse), vedi figura 2.

Come prima detto, la “Energia limite” è proporzionale alla quantità di calore ceduto all'esterno e quindi correlabile con la temperatura della superficie del provino. Tali ipotesi sono stati verificati sperimentalmente da Risitano e dal suo gruppo di ricerca [4,42] e sulla base delle stesse il metodo Risitano permette di determinare l'intera curva di fatica (la classica curva di Wohler) in tempi estremamente brevi. In particolare, in coerenza con quanto prima detto, è stato verificato sperimentalmente, che nel caso di prove di fatica, operando nelle stesse condizioni di prova (stessa frequenza, stesso rapporto di carico), il parametro energetico  $\Phi$ , integrale nel tempo della variazione di temperatura  $\Delta T$  rilevata nel punto (areola) più caldo (preso come riferimento) della superficie del provino per valori diversi di sollecitazione, risulta anch'esso costante (Fig. 2) e proporzionale al calore dissipato  $Q$  e quindi alla energia limite  $E_l$  [4,42]. Essendo  $E_l$  una costante caratteristica del materiale [10, 26], è possibile risalire alla classica curva “Tensione vs Numero di cicli” ( $\sigma$ - $N$ ) dalla conoscenza del terzo parametro  $\Delta T$  (incremento di temperatura in un punto della superficie del provino durante la prova di fatica).

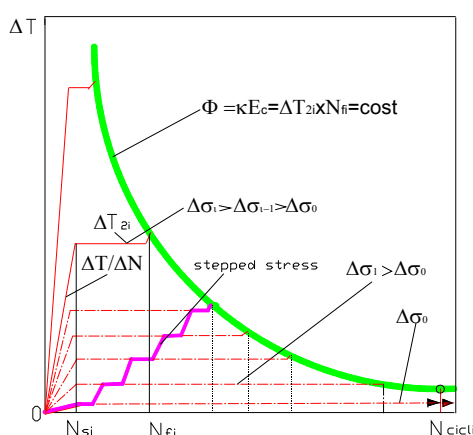


Figura 2: Parametro energetico  $\Phi$  costante come  $E_l$  per storie di carico ( $\Delta\sigma_i$ ) diverse.

E' noto poi che la rottura per fatica inizia nel punto in cui si raggiungono tensioni locali tali da produrre deformazioni (locali) plastiche. Se nel materiale esistono difetti strutturali o se sulle superfici esterne si hanno dei micro-difetti di lavorazione, in tali punti, si possono avere intensificazioni delle sollecitazioni rispetto a quelle medie definite dal rapporto fra il carico applicato e l'area della sezione del provino. Si raggiungono, quindi, condizioni di cedimento locale che costituiscono l'insnesco del fenomeno della rottura per fatica. Tali situazioni, ovviamente, non comportano alcun cambiamento visibile ed apprezzabile dal punto di vista statico non incidendo praticamente sulla sezione resistente del provino (la classica tensione media rimane la stessa). Si potrebbe definire, pertanto, limite di fatica del materiale quel valore di tensione (rilevabile in modo macroscopico) che produce nel materiale (sulla superficie o all'interno) condizioni di plasticizzazione locale (puntuale) non rilevabili con le classiche strumentazioni o sulla base dei parametri tradizionali ma osservabile dal rilievo della situazione termica del provino (del componente) su cui si sta operando.

Da tutto quanto detto prima si deduce che per lo studio della rottura a fatica dei materiali bisognerebbe, più verosimilmente, fare riferimento ad una “Energia limite” ( $E_l$ ) intesa come quella energia caratterizzante la resistenza del provino, costante per ciascun materiale (provino). Il raggiungimento di tale valore limite può essere attuato in infiniti modi (carichi elevati-tempi bassi, carichi bassi-tempi elevati) ovvero con diverse storie di carico (Fig. 2).

## LA TEMPERATURA NEL CASO DI PROVE STATICA DI TRAZIONE

**F**acendo riferimento al comportamento sotto carico (ad esempio di trazione) di un provino metallico, possiamo dividere il campo delle tensioni della classica prova statica ( $\sigma, \epsilon$ ) in differenti zone [7] (Fig.3).

- Zona I, la tensione media è così bassa che tutti i cristalli risultano stressati entro il loro campo elastico .
- Zona II, la tensione media è tale che nella maggior parte dei cristalli la deformazione è di tipo elastico, tuttavia in alcuni cristalli si presentano deformazioni plastiche accoppiate a quelle elastiche in modo che allo scarico il provino riprende ancora la forma iniziale. Considerato in modo macroscopico il provino si comporta ancora come perfettamente elastico.



- Zona III, la tensione media è tale che in alcuni cristalli esistono deformazioni elastiche accompagnate da deformazioni plastiche preponderanti su quelle elastiche e tali che alla cessazione del carico i cristalli deformati elasticamente non hanno energia per riportare il provino nelle condizioni iniziali. In tali condizioni è rilevabile un cambiamento nella forma del provino (comparsa di deformazioni permanenti).

- Zona IV, la tensione media ha raggiunto valori per cui la deformazione plastica è tale che la maggior parte dei cristalli risulta deformata plasticamente. I cristalli ancora deformati elasticamente risultano sempre di meno col progredire del carico e alla cessazione del carico le deformazioni diventano sempre più vistose.

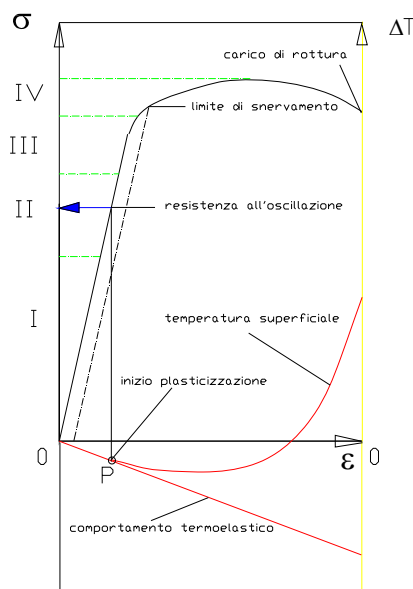


Figura 3: Curva Ingegneristica con l'individuazione qualitativa delle quattro zone caratteristiche.

Il valore della tensione di snervamento può essere assunto come quello di transizione fra la fase II e la fase III. Nei metalli, anche in quelli apparentemente perfetti, spesso la prima zona è molto limitata.

Le tensioni interne fra le regioni deformate elasticamente e plasticamente danno origine nei metalli policristalli ad un effetto “dopo elastico”. A tale effetto risulta collegato il fenomeno della isteresi elastica.

Se il carico è variabile (ad esempio oscillante) e siamo in presenza di fatica ad alto numero di cicli, si può avere un cambiamento della struttura interna anche se la tensione applicata appartiene al campo II. E' infatti possibile che il cedimento incominci in un punto per scorrimento e proceda con successiva rottura di un cristallo.

In tali condizioni, alla giunzione di certi legami atomici si verificheranno stati di tensione severi e con il progredire del numero di oscillazioni il processo continua con il superamento delle forze di coesione delle giunzioni. L'effetto cumulativo della rottura di giunzioni atomiche si incrementa dopo il primo apparire di discontinuità nella struttura passando dallo stato di microcricca, alla rottura per fatica (visibile).

Per quanto detto prima, se fossimo in presenza di un difetto localizzato, in una prova di trazione classica, avremmo lo stesso risultato globale (la stessa caratteristica macroscopica sforzi-deformazioni). Se però riducessimo via via le dimensioni del provino evidenziando il difetto rispetto alla area utile del provino stesso, fino ad arrivare, al limite, ad un provino che contiene un solo cristallo “difettato”, troveremmo un andamento qualitativamente dello stesso tipo, ma con valori del limite elastico (nel senso della classica definizione) diverso. In altre parole, il processo di plasticizzazione nel punto avverrebbe per un valore di limite elastico (locale) diverso del limite elastico macroscopico (globale) inteso, quest'ultimo, come tensione nominale media dovuta al carico totale esterno capace di produrre deformazioni permanenti dello 0.2%.

Il valore della tensione media (nominale) per cui a livello locale si manifesta la prima plasticizzazione (micro-plasticizzazione) è quello che poi in sollecitazioni dinamiche porta alla rottura del pezzo. Quindi si può definire come limite di fatica ad alto numero di cicli quella tensione limite  $\sigma_m = \sigma_0$  (della zona II) per cui in nessun punto del materiale si manifestano microplasticizzazioni locali. È verosimile pensare che il limite di fatica definito come prima si riferisca alla resistenza all'oscillazione  $\sigma_0$  (rapporto di carico  $R = -1$ ).



Dal punto di vista del comportamento termico di un materiale omogeneo sottoposto a trazione, possiamo distinguere due fasi:

- una prima fase in cui il materiale in tutti i punti si deforma elasticamente (zona I del diagramma di Fig. 3) in tale fase vale una relazione lineare fra tensioni e deformazioni;
- una seconda fase in cui non tutti i punti sono deformati elasticamente ma in qualche punto del materiale iniziano deformazioni plastiche permanenti (zona II del diagramma di Fig. 3).

La prima fase dal punto di vista del comportamento termico è regolata dalla teoria della termoelasticità.

La teoria della termoelastica per materiali solido isotropi sviluppata da Lord Kelvin già nel 1851, come è noto, parte dal primo principio della termodinamica e posta una legge costitutiva (4) (in forma vettoriale) del tipo:

$$\{\sigma\} = [C] (\{\varepsilon\} - \{\alpha\} \Delta T) \quad (4)$$

nell'ipotesi di fenomeno adiabatico, conduce all'equazione generale (5):

$$\rho c_e \Delta T / T = [(\{\varepsilon\} - \{\alpha\} \Delta T) \delta[C] / \delta T - (\{\alpha\} + \Delta T \delta\{\alpha\} / \delta T) [C]] \Delta\{\varepsilon\} \quad (5)$$

in cui  $c_e$  rappresenta il calore specifico a volume costante. Nel caso di materiale isotropo l'equazione si semplifica e diventa la (6):

$$\Delta T = -K_m T \Delta I \quad (6)$$

in cui  $\Delta I$  è la variazione della somma delle tensioni principali e  $K_m$  è la costante termoelastica del materiale (per acciai  $3,3 \times 10^{-12}$  [Pa<sup>-1</sup>]). Nel caso di prova di trazione (tensione monoassiale)  $\Delta I$  coincide con il valore della tensione media  $\sigma_m$  applicata e quindi più semplicemente la (7):

$$\Delta T = -K_m T \sigma_m \quad (7)$$

Nelle ipotesi precedenti, durante la prima fase della prova, esiste una perfetta proporzionalità fra tensioni applicate ed incrementi di temperatura rispetto alla temperatura iniziale (ambiente). Il rilievo della temperatura sulla superficie del provino mostrerebbe, in questa fase, in tutti i punti, un andamento perfettamente lineare con il progredire dei carichi applicati.

Se la tensione  $\sigma_p$  applicata dall'esterno, magari una frazione della tensione di snervamento ( $\sigma_{0,2}$ ), è tale che per effetto di qualsiasi difetto interno od esterno si raggiungono condizioni di tensioni locali tali da creare plasticizzazione in un volume elementare  $dV_p$ , il fenomeno per tale volume (in quel punto) non è più regolato dalla (6) (la legge costitutiva non è più la (4)) e per effetto delle deformazioni plastiche dissipative si producono sviluppi di calore  $dQ_p$  che modificano l'andamento lineare della variazione di temperatura con il carico. In tal caso il fenomeno non è più reversibile e l'entropia è funzione del "modo" in cui si raggiunge lo stato finale (la rottura). In tali condizioni, c'è, quindi, una parte del volume ( $V - dV_p$ ) che segue la legge termo-elastica e la parte plasticizzata che produce una quantità di calore che, nell'ipotesi di plasticizzazione ideale, per unità di volume, è pari a  $dQ_p = \sigma_p d\varepsilon_p$ .

Man mano che aumenta la sollecitazione, aumentano le deformazione plastiche nel volumetto  $dV_p$  ma, nello stesso tempo, si raggiungono condizioni locali in altri punti che producono l'inizio di altra plasticizzazione e l'apporto di ulteriori quantità di calore.

Le quantità di calore in gioco in questa fase sono, quindi, funzione non solo della sollecitazione ma anche delle coordinate del punto, della modalità di deformazione locale con il tempo di cedimento (inizio della plasticizzazione-rottura) di ciascun cristallo e del volume di materiale.

In letteratura esistono modelli analitici [9,11,27,28,29,31,33,35,38,41] che legano il danno con le variazioni di temperatura, specialmente per casi di sollecitazioni cicliche, tuttavia, il passaggio dalla formulazione matematica al risultato applicabile impone scelte di funzioni idonee a descrivere il progredire del danno con le coordinate spaziali e con il tempo.

Il problema, dal punto di vista del modello del calcolo, si complica e per una soluzione analitica occorrerebbe fare:

- ipotesi di danno sul volume totale (ad esempio progressione del danno con il progredire di micro vuoti);
- ipotesi sul modello di plasticizzazione locale;
- ipotesi sulle modalità di trasmissione del calore all'interno e verso l'esterno.

Ipotesi tutte che, comunque, possono fornire indicazioni solo di carattere generale. In una prova di trazione, nella prima fase, fino a quando non intervengono fenomeni di plasticizzazione locali, vale la teoria termo-elastica e il legame fra tensioni e temperatura, come precedentemente detto, è regolato dalla legge di Kelvin (7).





Qualitativamente si può osservare che man mano che il carico aumenta e il numero di cristalli plasticizzati aumenta, l'andamento della temperatura del materiale si discosta dall'andamento lineare per due motivi: diminuisce il volume di materiale interessato dall'effetto termoelastico (che si raffredda) ed aumenta il volume di materiale plasticizzato che si riscalda. Se ciascun cristallo avesse un comportamento perfettamente plastico, raggiunta il valore di tensione  $\sigma_p$ , la quantità di calore  $dQ_p$  fornito, sarebbe, come prima detto, proporzionale a  $(\sigma_p d\varepsilon_p)$ .

Se si fosse in grado di valutare il primo insorgere del calore  $dQ_p$  per effetto del carico medio esterno sul provino si individuerebbe la tensione di prima microplasticizzazione  $\sigma_0$ , di conseguenza, quello che convenzionalmente è definito limite di fatica del materiale per  $R=-1$ . Infatti, sollecitando il provino con carichi oscillanti e corrispondenti tensioni superiori a tale valore, dopo un certo tempo, si raggiungerebbe la rottura. Se invece il provino fosse sollecitato con valori inferiori a tale limite non si avrebbe alcuna rottura ed il materiale avrebbe durata infinita.

L'osservazione precedente mostra che il limite di fatica si può individuare se si riesce a legare il valore di tensione media con la comparsa della prima plasticizzazione che, come detto prima, comporta cedimento di calore al materiale e di conseguenza variazione della temperatura sulla superficie esterna del provino.

Dalle osservazioni precedenti, si deduce che se si opera con una prova statica e si segue la variazione di temperatura sulla superficie esterna della superficie del provino, è possibile valutare l'intorno in cui finisce di valere la linearità fra tensioni e temperature e corrispondentemente, quindi, l'intorno della tensione media  $\sigma_0$  per la quale è iniziata la fase di prima plasticizzazione (zona II). Al valore della "temperatura limite"  $T_0$ , coincidente con la fine della fase termoelastica, corrisponde quel valore  $\sigma_0$  che è stato la causa di inizio di microplasticizzazioni. Ed ancora, in un diagramma "tensioni vs variazioni di temperatura", tale valore di tensione media  $\sigma_0$  è, quindi, quello che ha prodotto una microplasticizzazione per la quale si è generata una quantità di calore che, in controtendenza, ha fatto variare la pendenza nella curva "sforzi vs variazioni di temperatura" ( $\sigma_m - \Delta T$ ).

Man mano che il carico cresce, le microplasticizzazioni aumentano (zona III del diagramma di Fig. 3) e la pendenza della curva varia con continuità fino a quando si raggiunge il valore del carico di snervamento. Superata la fase di snervamento, con il progredire della plasticizzazione, le quantità di calore in gioco sono tali da mascherare completamente l'effetto termoelastico dei cristalli ancora non plasticamente deformati e nell'ultima fase, per gli acciai, al contrario di quanto avviene nella zona I, si ha il riscaldamento di tutto il materiale con valori di temperatura superficiale positiva (zona IV della Fig. 3).

Nel diagramma qualitativo di Fig. 3 viene mostrato quello di cui si è precedentemente detto per un materiale impiegato in costruzioni meccaniche (ad esempio acciaio) sollecitato a trazione. Assieme al classico andamento "tensioni vs deformazione", nello stesso diagramma, viene riportato il terzo parametro, ovvero, la variazione di temperatura media  $\Delta T$  di una parte molto limitata della superficie del provino, quella più prossima alle prime variazioni di temperatura rispetto al valore iniziale  $T_a$  (temperatura ambiente).

In definitiva, per tensioni medie fino al valore  $\sigma_0$ , il legame tensioni temperature è di tipo lineare in coerenza con il comportamento termoelastico del materiale. Per valori superiori a  $\sigma_0$  ci si discosta dalla linearità e l'andamento della temperatura della zona di riferimento cambia pendenza in quanto non vale per tutti i punti del provino la legge di Kelvin. Tale fenomeno si esaspera man mano che il carico cresce fino a raggiungere, nell'ultima fase della prova, valori della temperatura superficiale positivi (ultima parte della curva).

Si può definire "temperatura limite"  $T_0$  quel valore di temperatura corrispondente alla fine della fase termoelastica, ovvero con riferimento alla Fig. 3, quella temperatura  $T_0$  corrispondente al cambiamento di pendenza. A tale valore di "temperatura limite" corrisponde, come più volte detto, un valore di tensione media (macroscopico) coincidente con il valore della classica resistenza all'oscillazione  $\sigma_0$  del materiale.

Le variazioni di temperatura durante l'esecuzione di prove statiche su acciai, secondo gli andamenti prima descritti sono state riscontrate e riportate da A. Risitano ed Altri in [5].

Gli Autori operando con gli giusti accorgimenti (ambienti controllati sia dal punto di vista termico che luminoso), con sensori ad alta precisione (sensibilità di almeno  $0,05\text{ C}^\circ$  per limitare le strumentali oscillazioni di temperatura durante il rilievo) nonché a velocità di prova (controllo di carico) adeguate (fra i 60 e i 30 N/s) hanno, per differenti materiali, potuto verificare che il valore di tensione  $\sigma_0$  corrispondente a  $T_0$  coincideva con valori del limite di fatica rilevati con prove tradizionali (Wohler) o con metodo termografico [2]. Hanno anche osservato che dalla misura della temperatura superficiale in prossimità ad intagli e in zone di stabilità di tensione (a distanza dagli intagli) è possibile risalire ai valori di effetto di intaglio caratteristici di quel dato provino.

Rimandando ad altra sede i risultati prima accennati, in questo caso ci si limita a riportare, a titolo di esempio, qualche dato relativo ad una applicazione su provini forati per cui il limite di fatica era stato ottenuto con altri metodi e per cui l'obbiettivo era quello di analizzare l'influenza della lavorazione con cui veniva ottenuto il foro.



I test meccanici sono stati eseguiti con l'ausilio di una macchina di prova oleodinamica prodotta dalla Instron (modello 8501, 100 kN Servo Hydraulic Machine) dotata di cella di carico da  $\pm 100$  kN.

Le immagini radiometriche sono state acquisite con uno scanner termografico prodotto dalla Flir System modello SC-3000.

Nella Fig. 5 è riportata le curve "carico vs spostamento" di un provino di acciaio Fe36 piatto forato sottoposto a prova di trazione. Le dimensioni sono riportate nella Tab. 1 e nella Fig. 4.

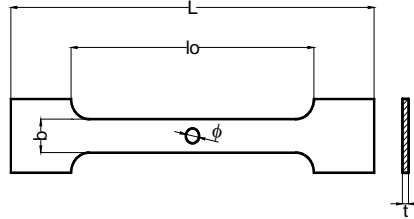


Figura 4: Disegno del provino con relative quote.

L [mm]	$l_0$ [mm]	b [mm]	t [mm]	$\phi$ [mm]
310.00	90	36	5.70	13.00

Tabella 1: Dimensioni geometriche provino.

La velocità con cui variava il carico era di 22N/s. Durante l'esecuzione della prova statica, è stato rilevato con lo scanner termografico il profilo della temperatura di tutta la superficie esterna del provino (Fig. 6).

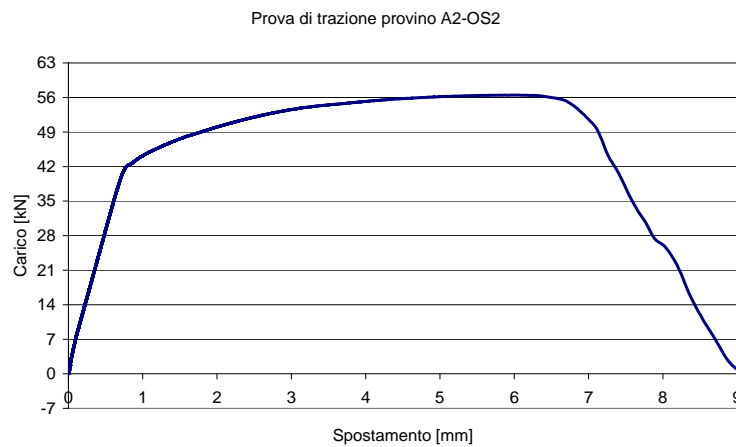


Figura 5: Curva Carico-spostamento provino A2-OS2.

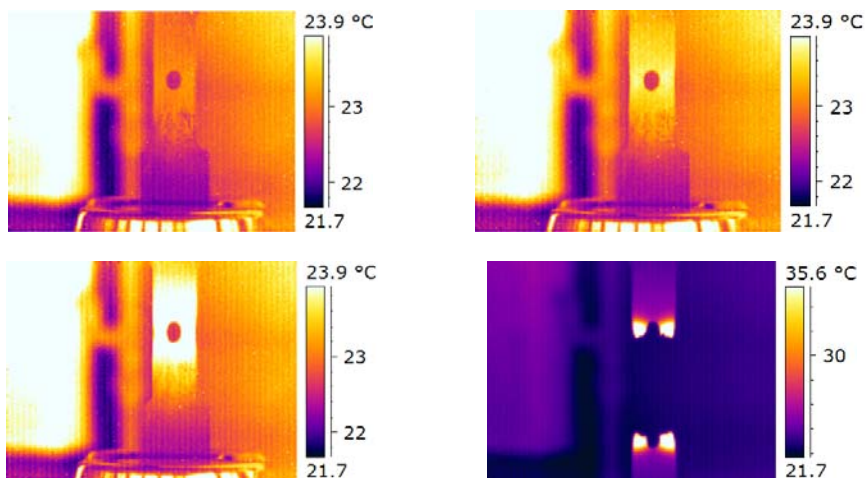


Figura 6: Alcune immagini della sequenza termografica acquisita A2-OS2.





In Fig. 7 è stato riportato il profilo termico di un punto della superficie del provino molto prossimo al bordo del foro. L'andamento del profilo evidenzia un primo tratto decrescente, tipico del comportamento termo-elastico del materiale. Si evidenzia in tale zona, un "punto" in cui la pendenza della prima parte della curva subisce una variazione; variazione dipendente dalle caratteristiche termoelastiche del materiale e correlata ai primi fenomeni di micro-plasticizzazione del materiale. Tale punto, come evidenziato da successive prove dinamiche, *coincide*, in termini di tensione, con il valore del limite di fatica oscillante ( $R=-1$ ). Nel caso in esame, il valore del carico corrispondente al cambio di pendenza del profilo termico è di 7 kN.

Ai valori di temperatura rilevati nella zona di comportamento totalmente elastico (carico minore di 7 kN) del diagramma, corrispondono valori di tensioni (locali) maggiori del valore della tensione media (Carico/Area netta della sezione).

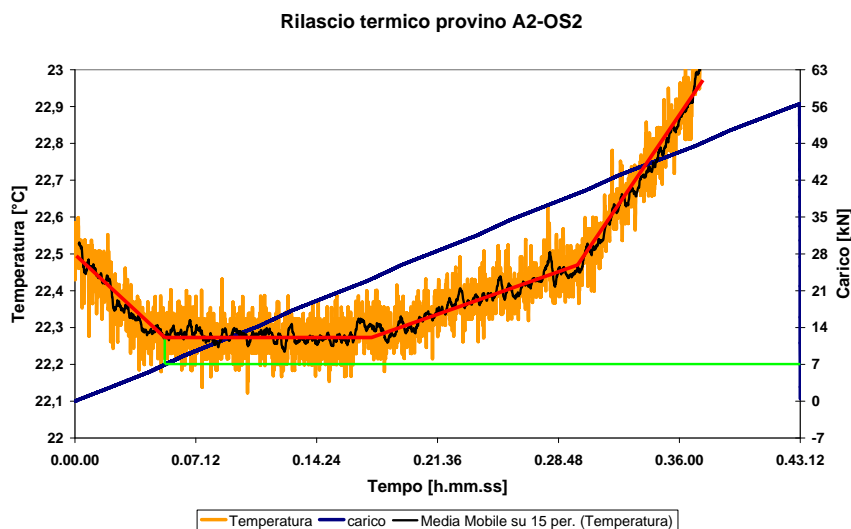


Figura 7: Profilo termico di un punto prossimo al foro del provino A2-OS2.

Nella Fig. 8, per un provino dello stesso acciaio e di dimensioni uguali a quello precedente ma con velocità di carico doppia 44 N/s, è riportato il profilo termico ottenuto in modo analogo a quanto detto prima (acquisizione di immagini e analisi in un punto prossimo al bordo del foro – Fig. 9). La lavorazione con cui era stato ottenuto il foro era di tipo differente da quello precedente. Come evidenziato da successive prove dinamiche, anche in questo caso, il valore del carico per cui avviene il cambio di pendenza nella curva di temperatura *coincide* con il valore del limite di fatica a carico oscillante ( $R = -1$ )

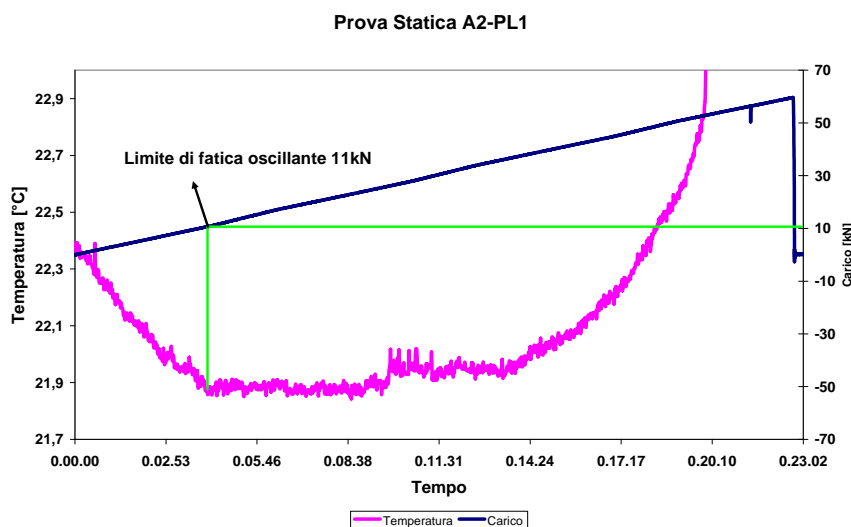


Figura 8: Prova di trazione e profilo termico di un punto prossimo al foro del provino A2-PL1.

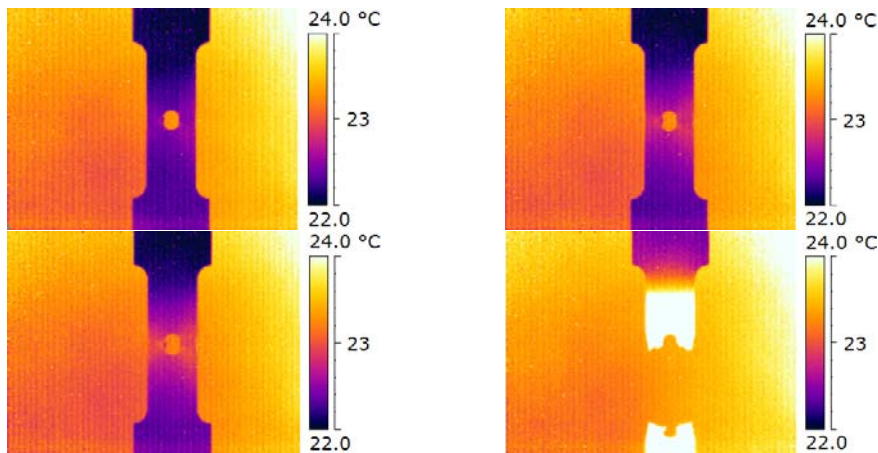


Figura 9: Alcune immagine della sequenza termografica acquisita A2-PL1.

## CONCLUSIONI

**D**opo avere evidenziato l'importanza della conoscenza della variazione di temperatura (terzo parametro) in prove di caratterizzazione dei materiali o di componenti meccanici, viene, sulla base di anni di esperienza, per la prima volta, indicato un modo di procedere per l'individuazione mediante prova statica del parametro  $T_0$  "Temperatura limite", caratterizzante però il comportamento a fatica del materiale.

Sulla base di considerazioni energetiche viene evidenziato come la rottura per fatica sia regolata dal raggiungimento di una "Energia limite" proporzionale a parametri valutabili mediante il rilievo della temperatura sulla superficie esterna del provino (o componente meccanico). Viene, di conseguenza, fornita una definizione più generale di limite di fatica.

Viene evidenziato come la conoscenza del campo di comportamento elastico di tutto il materiale (di tutti i cristalli) durante una prova statica di trazione diventi importante per individuare parametri caratterizzanti il fenomeno di rottura per fatica.

Viene definita la "Temperatura limite"  $T_0$  mediante prova statica e la corrispondente tensione  $\sigma_0$  che costituisce il valore limite di sollecitazione al di sopra del quale si manifestano fenomeni di microplasticizzazione che per carichi variabili nel tempo conducono alla rottura per fatica.

Viene osservato come dalla conoscenza della temperatura sul provino possa essere possibile risalire a fattori di forma o a fattori di effetti di intaglio.

Solo a titolo di esempio, infine, viene riportato, il risultato di prove effettuate su provini (utilizzati per altra ricerca) per i quali, la fine della fase termoelastica è particolarmente chiara, per cui, con la sola prova statica (di trazione), è stato possibile risalire al valore della resistenza all'oscillazione confermato anche da prove di fatica tradizionali.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Curti, G. La Rosa, M. Orlando, A. Risitano, 14<sup>th</sup> AIAS Italian National Conference, Catania Italia, (1986) 211.
- [2] G. Curti, A. Geraci, A. Risitano, *ATA Ingegneria Automotoristica*, 10 (1989) 634.
- [3] G. La Rosa, A. Risitano, *Int. J. Fatigue*, 22 (2000) 65.
- [4] G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano, *Int. J. Fatigue*, 24 (2002) 11.
- [5] A. Geraci, G. La Rosa and A. Risitano, 7<sup>th</sup> International conference on mechanical behaviour of material, The Hague (1995).
- [6] J. Kaleta, R. Blotny and H. Harig, *J. Test. Eval.*, 19 (1990) 326.
- [7] C.E. Feltner, J.D. Morrow, *Trans. ASME, Ser. D: J. Basic Eng.*, 83 (1961) 15.
- [8] R. Houwink, W.G. Burgers, *Elasticity, plasticity and structure of matter*, Cambridge at the University press, seconda edizione (1954).
- [9] K. Middelford, H. Harig, *Proceedings of international powder metallurgy conference and exhibition*, Verlag Schmid GmbH, Freiburg, (1986) 499.
- [10] D. Dengel, H. Harig, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 3 (1980) 113.
- [11] H. Harig, M. Weber, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international symposium*, Martinus Nijhoff Publ, The Hague (1983) 161.



- [12] O.A. Plenkev, N. Saintier, T. Palinluc, S.V. Uranov, Naimark, *Material Science and Engineering*, 462 (1-2) (2007) 367.
- [13] G. La Rosa, G. Mirone, A. Risitano, *J. of Engineering Fracture Mechanics*, 68 (2001) 417.
- [14] G. La Rosa, G. Mirone, A. Risitano, *Met. Mat. Trans. A*, 34 (3) (2003) 615.
- [15] G. La Rosa, G. Mirone, G. Risitano, *AIAS XXXVI Convegno Nazionale*, Napoli, (2007).
- [16] M.P. Luong, *Mech. Mater.*, 28 (1988) 155.
- [17] A. Blarasin, R. Fracchia, M. Pozzati, *ATA – Ingegneria Automotoristica*, 51 (5) (1988) 255.
- [18] T. Catalbiano, A. Geraci, M. Orlando, *Il Progettista Industriale*, (1984) 2.
- [19] K.L. Reifsnider, R.S. Williams, *Exp. Mech.*, 14 (1974) 479.
- [20] T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier, *Int. J. Fatigue*, 26 (2004) 221.
- [21] F. Curà, G. Curti, R. Sesana, *Int. J. Fatigue*, 27 (2005) 453.
- [22] P. Cugy, A. Galtier, *Fatigue 2002*. in: Blom AF, editors. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> international fatigue congress*, EMAS, I (2002) 549.
- [23] K. J. Miller, in: Piascik RS, Newman JC, Dowling NE, editors. *ASTM STP 1296*, (1997) 267.
- [24] Y. Akiniwa, K. Tanaka, H. Akimura, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 24 (2001) 817.
- [25] Y. Murakami, *Metal fatigue: effects of defects and non metallic inclusions*, Elsevier (2002).
- [26] M.P. Luong, *Nucl. Eng. Des.*, 158 (1995) 363.
- [27] G.R. Halford, *J. Mater.*, 1 (1966) 3.
- [28] R. Blotny, J. Kaleta, *Int. J. Fatigue*, 1 (1986) 29.
- [29] C.E. Feltner, J.D. Morrow, *Trans. ASME, Ser. D: J. Basic Eng.*, 83 (1961) 15.
- [30] E. Charkaluk, A. Bignonnet, A. Costantinescu, K. Dang Van, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 25 (2002) 1199.
- [31] N.W. Klingbeil, *Int. J. Fatigue*, 25 (2003) 117.
- [32] E.K. Gamstedt, O. Redon, P. Brønsted, *Key Eng Mater*, 221–222 (2002) 35.
- [33] B. Atzori, E. Gasparini, G. Meneghetti, *Proceedings of 30<sup>th</sup> AIAS national conference*; (2001) 367.
- [34] B. Yang, P.K. Liaw, H. Wang, L. Jang, J.Y. Huang, R.C. Kuo, J.G. Huang, *Mater. Sci. Eng. A*, 314 (2001) 131.
- [35] B. Atzori, G. Meneghetti, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> international conference on low cycle fatigue* (P.D. Portella, H. Sehitoğlu and K. Hatanaka, Editors) *DVM*, Berlin (2003) 147.
- [36] N. Ranc D. Wagner, P.C. Paris, *Acta Materialia*, 56(15) (2008) 4012.
- [37] P. Starke, F. Walther, D. Eifler, *5<sup>th</sup> Int. Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS2007)*, Timisora, Romania, (2007).
- [38] G. Meneghetti, *Int. J. of Fatigue*, 29(1) (2007) 81.
- [39] B. Berthel, B. Wattrisse, A. Chrysochoos, A. Galtier, *Strain*, 43 (3) (2007) 273.
- [40] M. Selek, Ö. S. Şahin, Ş. Kahramanlı, *EUROCON 2007 The International Conference on “Computer as a Tool”* Warsaw, (2007).
- [41] T. Oulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier, *Int. J. of Fatigue*, 26 (2004).
- [42] V. Crupi, *Int. J. of Fatigue*, 30 (7) (2008) 1150.

## NOMENCLATURA

$E_l$  energia limite necessaria per raggiungere la rottura.

$\sigma_0$  resistenza all'oscillazione (tensione corrispondente alla fine della fase totalmente elastica)

$\sigma_i$  tensione minima

$\sigma_s$  tensione massima

$\sigma_m$  tensione media

$\sigma_p$  tensione plastica

$\sigma_{0,2}$  limite elastico del materiale

$f$  frequenza di prova

$\varepsilon_p$  deformazione unitaria relativa alla fase plastica

$R$  fattore di carico

$N$  numero di cicli

$\varepsilon$  deformazione unitaria

$\varepsilon_0$  deformazione unitaria corrispondente alla fase totalmente elastica

$\sigma$  tensione

$\alpha$  coefficiente di dilatazione termica lineare



- $T$  temperatura superficiale del provino durante la prova  
 $T_a$  temperatura iniziale del provino (temperatura ambiente)  
 $T_0$  “temperatura limite” di un punto del provino corrispondente alla fine del comportamento termoelastico  
 $\Delta T$  incrementi della temperatura superficiale del provino rispetto alla temperatura iniziale  
 $E$  modulo elastico del materiale  
 $\nu$  modulo di Poisson del materiale  
 $\rho$  densità del materiale  
 $\lambda, \mu$  costanti di Lamè  
 $c_\varepsilon$  calore specifico a deformazione costante  
 $c_\sigma$  calore specifico a tensione costante  
 $k_c$  coefficiente di convezione termica  
 $K_m$  costante termoelastica del materiale  
 $W^e$  componente elastica del lavoro meccanico  
 $W^p$  componente plastica del lavoro meccanico  
 $dQ_p$  energia liberata per deformazione plastica  
 $dQ_e$  energia liberata per deformazione elastica  
 $V$  volume di riferimento del provino  
 $V_p$  volume plasticizzato