

# Variazioni del modulo elastico dinamico nei materiali metallici in seguito ad affaticamento

(A.L. Audenino<sup>1</sup>, V. Crupi<sup>2</sup>, E.M. Zanetti<sup>2</sup>)

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Università di Catania

<sup>2</sup> Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino

## **Sommario**

Gli autori propongono una nuova metodologia per il rilievo dell'incrudimento/addolcimento dei materiali metallici in seguito ad affaticamento con sollecitazione ciclica alternata. La metodologia presentata viene confrontata con altri metodi sperimentali attualmente utilizzati illustrandone i principali benefici. Seguono alcune applicazioni sperimentali.

## **Introduzione**

Una caratteristica peculiare dei materiali metallici sottoposti a carichi ciclici, è che le proprietà meccaniche variano; con particolare riferimento al comportamento elastico, alcune volte si verifica un incrudimento, cioè un incremento del modulo elastico; più spesso si assiste invece a fenomeni di addolcimento, cioè di progressiva diminuzione del modulo elastico con l'affaticamento. In entrambi i casi le variazioni di modulo elastico sono collegabili alle variazioni di struttura interne e, più in particolare, sono collegabili all'accumulo del danno all'interno del materiale stesso. Sarebbe pertanto di fondamentale importanza il poter collegare tali variazioni alla previsione della rottura per fatica ed alla vita residua.

La maggior parte dei metodi sperimentali finalizzati alla valutazione delle variazioni delle caratteristiche meccaniche nel corso dell'affaticamento, sono stati sviluppati nel campo della fatica a basso numero di cicli (ossia per valori significativi della deformazione plastica) [1, 2]; si hanno decisamente meno informazioni per quanto riguarda la fatica ad alto numero di cicli, nonostante questa sia la condizione in cui più sovente lavorano le strutture meccaniche. Gli approcci sperimentali per il rilievo della curva ciclica tensione/deformazioni in campo elastico possono seguire due filosofie, apparentemente opposte, a seconda che venga privilegiata un'analisi micro o macroscopica. È noto infatti che il comportamento globale della struttura rimane elastico e l'affaticamento si riflette in una variazione della pendenza della retta secante che unisce i due punti estremi del ciclo di isteresi; d'altra parte, è ormai noto che vi sono singoli cristalli in cui, a cause di un'orientazione sfavorevole rispetto al carico, hanno luogo micro-scorrimenti plastici creando un microdanneggiamento che, per un elevato numero di cicli, può portare a rottura.

Recentemente è stato proposto un metodo basato sui rilievi di micro-durezza sulla superficie del campione [1], ritenendo, in questo modo, di poter isolare i cristalli che hanno subito una significativa deformazione plastica. Emerge comunque la difficoltà di poter ispezionare un intero provino al fine di poterne trarre indicazioni sintetiche; inoltre si possono eseguire solo rivelazioni sui cristalli superficiali.

L'approccio qui seguito si basa invece su un'analisi macroscopica, valutando l'eventuale incrudimento o addolcimento del materiale tramite il modulo elastico dinamico [4]. La misura del modulo elastico dinamico è stata effettuata in modo indiretto, tramite la frequenza di risonanza di una macchina di prova che lavora in condizioni di risonanza (pulsatore). La misura tradizionale del modulo elastico costringerebbe invece alla sospensione della prova di fatica per eseguire la prova di trazione statica; ne deriverebbero lunghi tempi di sperimentazione, insieme con la possibilità che vengano introdotti degli artefatti.

La metodologia messa a punto è stata applicata su provini in diversi materiali, in modo da poter distinguere il tipo di comportamento peculiare per ciascun materiale e la variabilità riscontrabile tra un provino e l'altro.

## Materiali e metodi

### Carichi e sensorizzazione

È stato utilizzato come macchina di prova il vibroforo *Amsler 10 HFP 422*, dotato di elettronica 3033/a. Tale macchina dinamica può dare un carico massimo pari a 200 kN ed un'ampiezza massima di sollecitazione pari a 100 kN

La peculiarità del vibroforo consiste nel fatto di essere in grado di raggiungere autonomamente le condizioni di risonanza: il segnale acquisito da una cella di carico posta sotto l'estremità inferiore del campione, viene sfasato di 90° ed è quindi utilizzato per alimentare lo shaker eccitatore del sistema. Il sistema è costituito sostanzialmente da due masse, una decisamente maggiore dell'altra, come esemplificato in figura 1. La frequenza di risonanza può essere variata cambiando la massa superiore  $M_1$ , la più piccola, che è costituita da una massa fissa alla quale possono essere collegate fino a cinque masse aggiuntive ognuna divisa in due emidischi.

Il vibroforo è dotato di diversi tipi di afferraggi in modo da poter dare carichi assiali, flessionali e torsionali. In questo caso sono stati utilizzati gli afferraggi per provini piatti ed è stata imposta una tensione uniassiale alternata.

Come verrà spiegato nella sezione relativa alla metodologia di prova, dopo avere raggiunto una condizione di equilibrio, viene eliminato il carico dinamico e si ottiene così una vibrazione libera smorzata; tale vibrazione è stata rilevata per mezzo di un accelerometro [3] (Bruel Kjaer 4370 amplificato da Bruel Kjaer 2635), posto sulla superficie della massa superiore  $M_1$  (fig. 1).

Il segnale dell'accelerometro viene acquisito per mezzo di una scheda Data Physics DP 310-420, caratterizzata da una frequenza massima di campionamento pari a 84 kHz e da un fondo scala del segnale di uscita in tensione che può essere selezionato da 0.015 V a 10 V.

### Provini

Sono stati costruiti dei provini piatti seguendo le istruzioni presenti nel manuale *Amsler*; la sezione è stata posta pari a 15x4mm ed il tratto utile ha una lunghezza pari a 75 mm. 20 provini sono stati realizzati in Fe360, altrettanti sono stati realizzati in AISI 304; nella fase iniziale di messa a punto, sono stati anche analizzati 14 provini in acciaio C70 ricotto, aventi una sezione pari a 2x18 mm ed un tratto utile di lunghezza pari a 80 mm.

### Metodologia

Il vibroforo può essere schematizzato in modo semplificato come in fig.2; se ne deducono i seguenti modi propri di vibrazione:

$$\lambda_1 = 0; \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{k_{eq}}{M_{eq}}}; \quad \frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_s}; \quad \frac{1}{M_{eq}} = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \approx \frac{1}{M_2} \quad (1)$$

Volendo isolare il contributo dato dal solo provino, è necessario eseguire un'ulteriore prova, utilizzando la stessa massa superiore  $M_1$  e sostituendo il provino con un provino detto di 'corto circuito', in cui è stato eliminato il tratto a larghezza calibrata. Con semplici passaggi si deduce la nuova frequenza di vibrazione che è pari a:

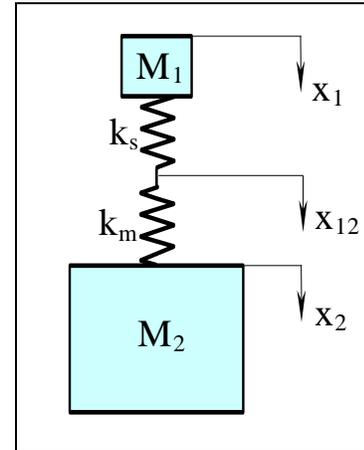


Fig.1 Rappresentazione schematica del vibroforo Amsler

$$\lambda_2' = \sqrt{\frac{k_{eq}'}{M_{eq}}}; \quad k_{eq} = k_m; \quad \frac{1}{M_{eq}} = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \approx \frac{1}{M_2} \quad (2)$$

E' quindi possibile ricavare la rigidezza del provino con l'espressione che segue:

$$k_s = \frac{k_m}{\left(\frac{\lambda_2'}{\lambda_2}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

La rigidezza del provino è legata al modulo elastico del materiale costitutivo che può essere ricavato con la relazione che segue:

$$E = \frac{k_s \cdot l}{A} \quad (4)$$

La metodologia messa a punto prevede che il provino venga sollecitato con una trazione uniassiale alternata ad ampiezza costante; ogni 20000 cicli la forzante viene rimossa e viene acquisito, tramite l'accelerometro, un segnale di decadimento smorzato.

### Analisi del segnale

L'analisi del segnale sviluppata consente di valutare l'andamento della frequenza di risonanza e dello smorzamento e in funzione dell'ampiezza di sollecitazione; questa operazione è stata messa a punto in [3] introducendo la trasformata di Hilbert del segnale al fine di ottenerne la curva di inviluppo e la fase. Nello stesso lavoro è stata anche messa a punto una nuova tecnica per il pre-trattamento del segnale che consente di minimizzare gli errori di leakage: il segnale viene troncato in modo da farlo iniziare esattamente in corrispondenza del primo massimo e da farlo terminare in corrispondenza del punto immediatamente precedente l'ultimo massimo; in seguito viene aggiunto in coda al segnale ottenuto il suo simmetrico (Figura ).

L'inviluppo della curva di decadimento e la retta che descrive l'andamento della fase in funzione del tempo vengono poi suddivisi in diversi tratti, per ciascuno dei quali vengono valutati l'ampiezza media di oscillazione, l'esponente di decadimento (per mezzo dell'interpolazione lineare del logaritmo della funzione inviluppo), la frequenza di risonanza (per mezzo dell'interpolazione lineare della funzione fase). In particolare la frequenza di risonanza può essere dedotta dalla pendenza  $m$  della retta che interpola la funzione fase della trasformata di Hilbert:

$$f = \frac{m}{2\pi} \quad (5)$$

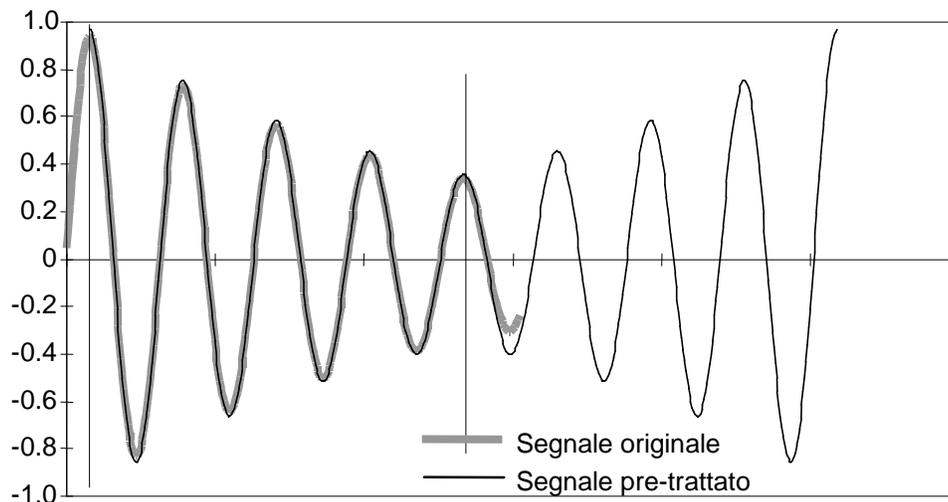


Figura 2 Segnale originale e segnale trattato per eseguire la trasformata di Hilbert

## Risultati e discussione

Nelle figure che seguono sono stati riportati, a livello esemplificativo, alcuni fra i risultati ottenuti nel corso delle prove sperimentali. Le figure 3 e 4 illustrano i risultati ottenuti con due differenti provini in Fe360. Nel caso della figura 3 il provino è stato sollecitato ad una tensione assiale alternata pari a 256 MPa, circa del 30% superiore al limite di fatica pari a 200 MPa; il provino si è rotto dopo 230000 cicli, quindi l'ultimo rilievo è stato effettuato immediatamente prima della rottura. Il provino di figura 4 è stato invece sollecitato ad una tensione pari al limite di fatica e non si è rotto dopo 5 milioni di cicli.

Si nota, in entrambi i casi, un comportamento di tipo *softening*, ossia un processo di addolcimento con riduzione del modulo elastico, con l'aumentare della tensione ed, a parità di tensione, con l'aumentare del numero di cicli di affaticamento. Nel caso del provino rotto la variazione associata alla sollecitazione del materiale è circa uguale a quella indotta dall'affaticamento, mentre nel caso del provino non rotto le variazioni indotte dall'affaticamento sono decisamente più piccole delle altre. Il comportamento rispetto all'affaticamento è asintotico nel senso che, con il progredire dell'affaticamento la curva di variazione della frequenza con la tensione tende a stabilizzarsi; in altre parole la velocità con la curva varia la sua posizione tende a zero. Ciò tuttavia indipendentemente dal manifestarsi della rottura oppure no; nel caso della figura 3 infatti la curva stabilizzata viene abbandonata soltanto nell'imminenza della rottura del provino.

Per quanto riguarda i provini in AISI 304, le prove sono state eseguite incrementando il valore dell'ampiezza di sollecitazione ogni 20000 cicli fino al raggiungimento di 150 MPa, valore inferiore al limite di fatica; il carico è rimasto poi costante fino al raggiungimento dei cinque milioni di cicli. Nelle due figure 5 e 6 sono state considerate due prove eseguite a due diverse frequenze di sollecitazione: 100 Hz (fig. 6) e 160 Hz (fig. 5).

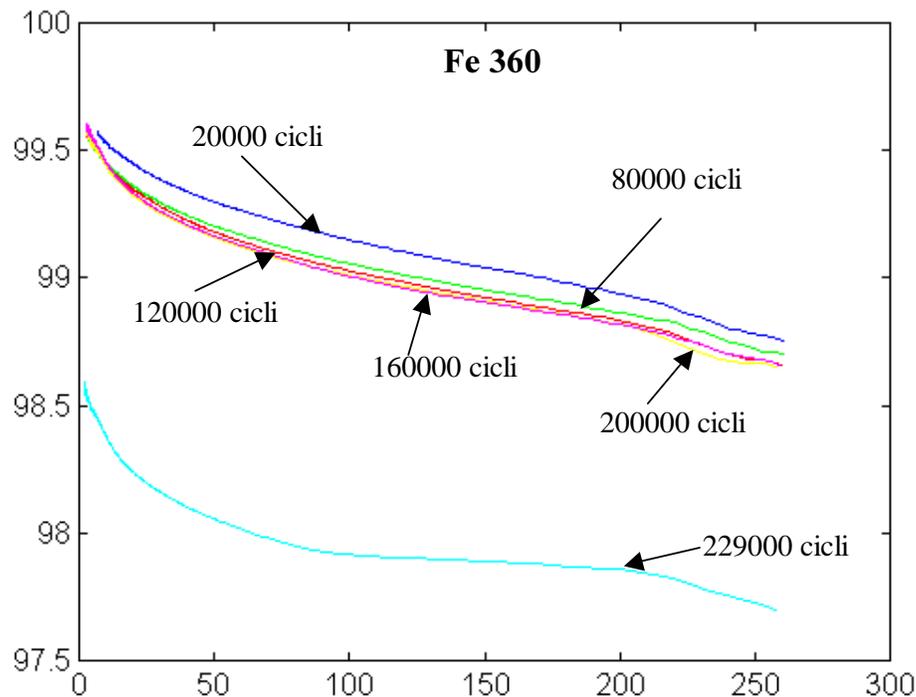


Figura 3 - Fe360; ampiezza di sollecitazione pari a 256 Mpa: Andamento della frequenza in funzione dell'ampiezza di sollecitazione per diversi valori del numero di cicli di affaticamento

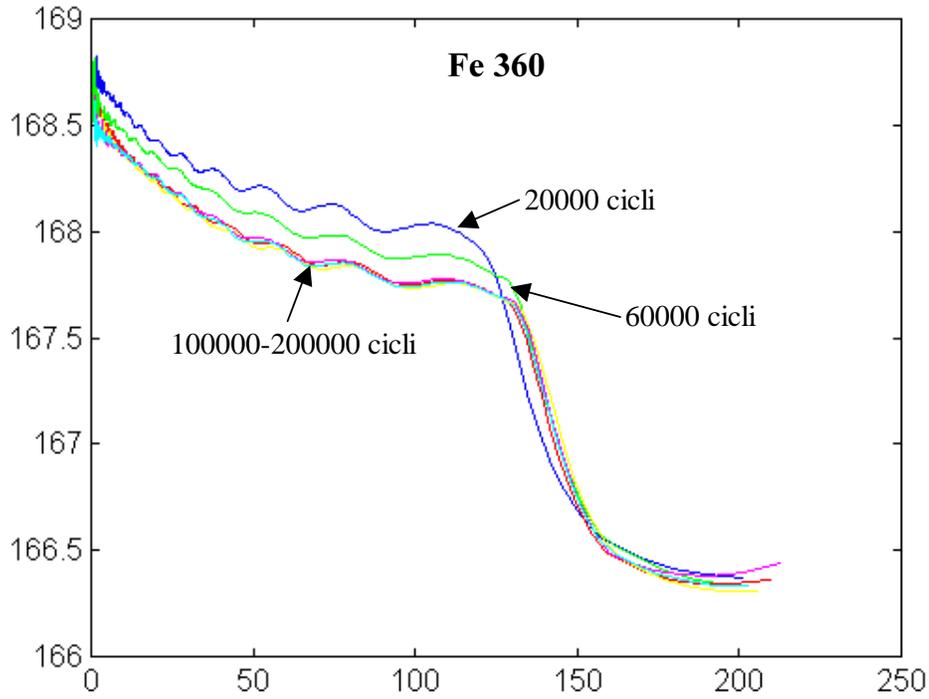


Figura 4 - Fe360; ampiezza di sollecitazione pari a 200 Mpa: Andamento della frequenza in funzione dell'ampiezza di sollecitazione per diversi valori del numero di cicli di affaticamento

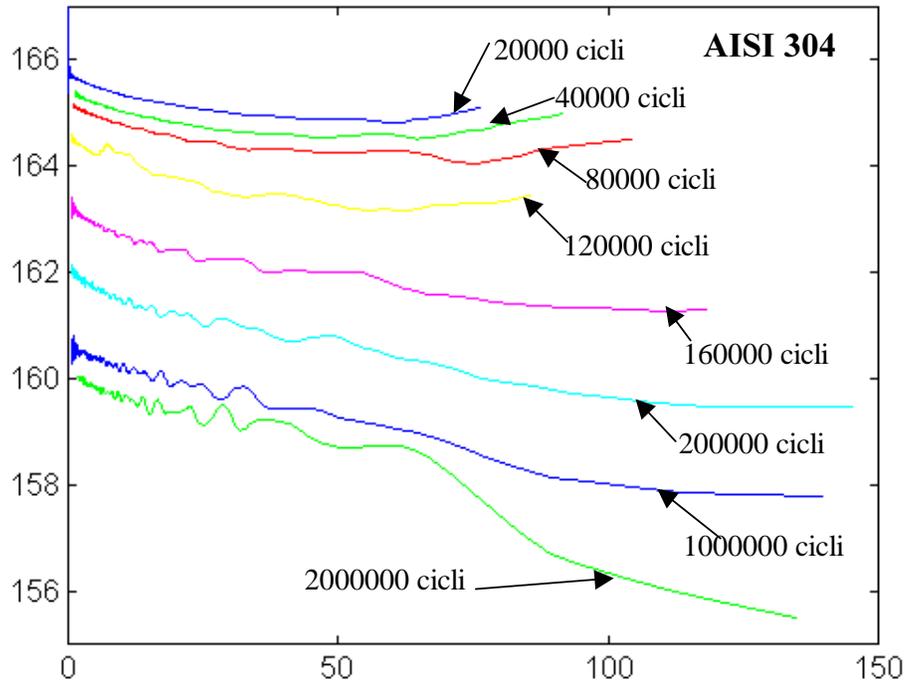


Figura 5 - AISI304; ampiezza di sollecitazione crescente da 83MPa a 183 MPa: Andamento della frequenza in funzione dell'ampiezza di sollecitazione per diversi valori del numero di cicli di affaticamento. Frequenza 160 Hz.

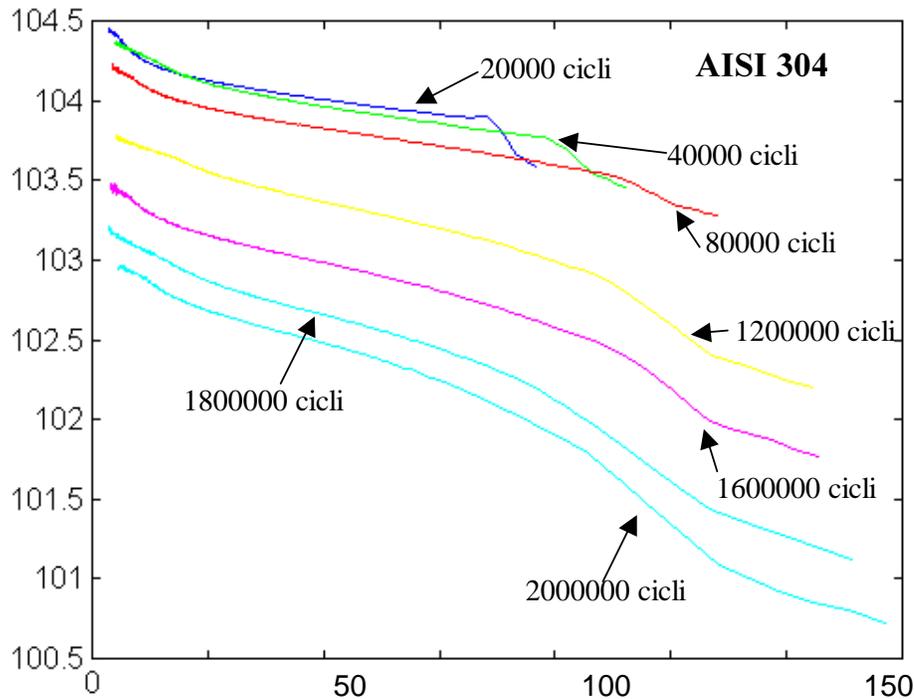


Figura 6 - AISI 304; ampiezza di sollecitazione crescente da 83 MPa a 183MPa: Andamento della frequenza in funzione dell'ampiezza di sollecitazione per diversi valori del numero di cicli di affaticamento. Frequenza 100 Hz.

Pur evidenziandosi chiaramente un comportamento di tipo *softening*, l'AISI304, diversamente dall'FE360, non raggiunge mai un comportamento asintotico ma la curva si modifica sempre in modo apprezzabile, anche nel caso di provini non rotti con superamento dei cinque milioni di cicli. Anche in questo caso soltanto nelle immediate vicinanze della rottura si assiste ad una importante diminuzione della curva.

### **Conclusioni**

E' stata messa a punto una metodologia che permette di analizzare le variazioni di modulo elastico dinamico nel corso dell'affaticamento per prove di fatica ad alto numero di cicli. Si è evidenziato come la metodologia messa a punto sia capace di cogliere anche variazioni molto modeste del modulo elastico, rilevando variazioni della frequenza di risonanza inferiori a 0.5 Hz. Oltre alle attrezzature necessarie per la prova di fatica è sufficiente l'aggiunta di un accelerometro ed un sistema di acquisizione dati per impiegare la tecnica sperimentale proposta.

Sono stati presentati alcuni risultati ottenuti su due diversi materiali: FE360 e AISI304. I comportamenti dei due materiali sono sostanzialmente diversi in quanto uno (FE360) è caratterizzato dal raggiungimento di una curva stabilizzata all'aumentare dell'affaticamento mentre l'altro (AISI304) manifesta una curva sempre variabile. In entrambi i casi in prossimità della rottura si assiste a variazioni decisamente più importanti del modulo elastico dinamico.

E' tuttavia ancora da estendersi la sperimentazione ad altri materiali e sono parimenti da interpretarsi i risultati ottenuti anche alla luce dei numerosi modelli di danneggiamento microscopico diffusi in letteratura.

## **References**

- [1] Ye D., Tong X., Yao L., and Yin X.; Fatigue hardening/softening behaviour investigated through Vickers microhardness measurements during high-cycle fatigue. *Mat Chem and Phys* 56 (1998), 199-204
- [2] Lukas P., Kunz L.; Cyclic plasticity and substructure of metals. *Mat Sci and Eng A* 322 (2002), 217-227
- [3] Audenino A. L., Calderale P.M., *The Measure of Non-linear Internal Damping in Metals: Processing of Decay Signal in Uni-axial Stress Field*. *Journal of Sound and Vibration* 198, no 4 (1996) 395-409.
- [4] Calderale P.M., Garro A., *Principi e metodologie della progettazione meccanica*, vol. III. Levrotto e Bella.