

DISPERSIONE DEI DATI IN PROVE DI FATICA OLIGOCICLICA:  
CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI DI UN ROUND ROBIN

V. Bicego, CISE, Segrate-Milano  
S. Ragazzoni, ENEL/CRTN, Milano

Sommario. Viene analizzata la variabilità dei risultati ottenuti in prove di fatica oligociclica effettuate nell'ambito di un Round Robin al quale hanno partecipato diversi laboratori europei e giapponesi, evidenziando in particolare la collocazione dei dati ottenuti al CISE. Vengono discusse implicazioni derivanti dall'impiego di dati affetti da rilevante incertezza sperimentale per quanto riguarda l'affidabilità delle previsioni di vita dei componenti.

INTRODUZIONE

Nell'ambito delle attività VAMAS e CEE il Community Bureau of Reference della CEE ha recentemente organizzato e coordinato un Round Robin di prove di Fatica Oligociclica (Low Cycle Fatigue, LCF), finalizzato alla definizione di una normativa europea. Al Round Robin hanno partecipato 26 laboratori (16 europei, di 6 paesi diversi, e 10 giapponesi). La partecipazione italiana è stata assicurata dal CISE, anche nell'ambito di una commessa di ricerca ENEL/CRTN.

Per le prove sono stati scelti gli acciai AISI 316 e 9CrMo e le superleghe di Ni IN718 e Ni101. Sui materiali è stata svolta preliminarmente una estesa caratterizzazione meccanica volta a verificarne la omogeneità. Le prove LCF sono state condotte seguendo delle 'guidelines' elaborate dal BCR in collaborazione con il National Physical Laboratory, UK [1]: le condizioni di prova fissate hanno riguardato il tipo di prova, trazione-compressione con rapporto  $R=-1$  in controllo di deformazione, la velocità di deformazione,  $2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , e la temperatura di prova,  $550^\circ\text{C}$  per gli acciai e  $850^\circ\text{C}$  per le leghe di Ni. La scelta della geometria del campione, della tecnica estensimetrica e delle modalità di riscaldamento e misura della temperatura è stata lasciata ai singoli laboratori. Le linee guida indicavano anche la procedura di elaborazione dei risultati (in particolare la definizione della vita  $N_f$  dei campioni e la determinazione delle componenti elastica e plastica del ciclo di isteresi). In sostanza veniva lasciata la massima libertà di azione, senza alcun tentativo di uniformare le procedure di prova, lo scopo essendo quello di verificare le dispersioni di risultati LCF prodotti da laboratori lasciati liberi di operare secondo le loro autonome consuetudini.

Al CISE sono state condotte prove su Ni101, AISI 316 e 9CrMo [2]. Il campione adottato è stato del tipo a clessidra con misura della deformazione diametrica ed uso di un modulo analogico 'strain computer' per la determinazione della deformazione assiale, usata per il controllo. Per il riscaldamento dei

campioni si sono utilizzati un forno a resistenza, per le prove a 550°C, ed un dispositivo ad induzione, per le prove a 850°C. Le prove sono state condotte a tre intervalli di deformazione totale: 0.5, 1 e 2%.

Con riferimento ai tre materiali provati al CISE, viene nel seguito discusso l'ammontare della 'variabilità' generale dei dati, evidenziando in particolare la 'posizione' dei risultati CISE.

## RISULTATI

L'analisi globale dei risultati ottenuti dai vari laboratori, effettuata da NPL [3] ha evidenziato una forte dispersione, con fattori di variabilità della vita a fatica anche superiori a 10. Analisi statistiche più dettagliate, svolte su gruppi di dati appartenenti a set di prove più omogenee (ad esempio con geometria di campione simile o con lo stesso tipo di termocoppia), effettuate allo scopo di verificare se si potesse ridurre la variabilità, non hanno dato alcun risultato significativo. Pur non essendo stato chiarito come la variabilità possa essere ridotta, è convinzione di tutti gli esperti coinvolti che l'origine primaria dello 'scatter' sia da attribuire alla misura della deformazione. Un aspetto fondamentale nella misura della deformazione è in particolare anche il grado di allineamento della catena di carico e la capacità di mantenere tale allineamento durante la fase di compressione plastica. Questa variabile appare difficilmente valutabile nell'analisi globale dei dati.

Nel seguito vengono considerati i dati di sforzo-deformazione ciclici,  $\Delta\sigma - \Delta\varepsilon_t$ , rilevati dai cicli a metà vita, e i dati deformazione - cicli a rottura,  $\Delta\varepsilon_t - N_f$ . In entrambi i casi la variabilità è analizzata in termini quantitativi, attraverso curve medie e curve che delimitano bande di variabilità entro la dispersione standard (errore quadratico medio; ove valesse un'ipotesi di legame lineare fra le variabili, e ipotizzando inoltre variabili normalmente distribuite, si potrebbe parlare di bande di confidenza al 68% di probabilità). I risultati sforzo-deformazione e deformazione-vita sono riportati, insieme alle curve medie ed alle bande di dispersione, rispettivamente nelle Figg. 1a - 1e e 2a - 2e; in particolare le Figg. 1b, 1d, 1e e 2b, 2d, 2e mostrano la posizione dei risultati CISE.

I risultati di sforzo - deformazione ottenuti nelle diverse prove mostrano una dispersione rilevante. In particolare per Ni101 e deformazione 1.2% il valore della sollecitazione sulla curva che delimita superiormente la banda di confidenza è maggiore del 11% rispetto al valore in corrispondenza della curva media della popolazione; lungo l'asse delle deformazioni la discrepanza è del 25%. Per quanto riguarda i dati CISE, essi sono tutti interni alla banda di variabilità considerata.

I dati deformazione - vita risultano in generale anch'essi piuttosto dispersi. Nella situazione migliore i valori di durata in corrispondenza della curva superiore della banda sono maggiori del valore sulla curva media per un fattore 1.4 (caso delle prove su AISI 316, deformazione 2%) mentre nei casi peggiori, cioè per

lunghe durate, si arriva a un fattore 7 (Ni101, deformazione 0.5%). In questo caso i dati CISE si collocano tendenzialmente verso il limite superiore della banda. Questo risultato è probabilmente imputabile all'aver impiegato al CISE, unico fra tutti i laboratori, una tecnica estensimetrica diametrale anziché assiale (in precedenti prove comparative svolte al CISE su campioni cilindrici con estensimetri assiali e su campioni a clessidra con estensimetri diametrali si erano riscontrati valori di durata sistematicamente superiori nel secondo caso per un fattore 1.4).

#### VARIABILITA' SPERIMENTALE E AFFIDABILITA' NELLE PREVISIONE DI VITA DEI COMPONENTI

Alla luce delle rilevanti differenze fra i dati evidenziate da questo Round Robin, da più parti ci si chiede che grado di fiducia si possa attribuire alle stime di durata LCF dei componenti ricavate da caratteristiche LCF del materiale valutate in modo così aleatorio, con risultati differenti a seconda del laboratorio al quale ci si rivolge per le prove sui campioni. In effetti la probabilità di ricevere da un laboratorio una curva di durata che sovrastima la vita reale anche per un'ordine di grandezza è rilevante; i coefficienti di conservatività usualmente suggeriti dai codici sono appena sufficienti a controbilanciare tale errore. Pur condividendo queste preoccupazioni, tuttavia da tempo è venuta maturando negli autori di questa nota l'idea, pur inizialmente non giustificata da analisi precise, che nel caso particolare di utilizzare per la previsione di vita di un componente le curve  $\Delta\sigma - \Delta\varepsilon_t$  e  $\Delta\varepsilon_t - N_f$  determinate dallo stesso laboratorio, il problema dovrebbe essere grandemente ridotto.

Alla base di questa convinzione vi è l'idea, comune a molti esperti di prove LCF, che la maggior parte della variabilità dei risultati delle prove LCF sia imputabile a problemi di misura della deformazione sui provini: ciò comporta variabilità all'interno di uno stesso laboratorio e differenze sistematiche fra laboratorio e laboratorio. Gli errori sistematici fra laboratorio e laboratorio sono i più pericolosi per la correttezza delle previsioni ingegneristiche del danno LCF su componenti. Ebbene, nel caso di un laboratorio che per esempio valuta le deformazioni con errori sempre per eccesso, la curva  $\Delta\sigma - \Delta\varepsilon_t$  risulta definita in modo sbagliato e il suo impiego nella analisi elastoplastica del componente comporta un risultato conservativo (la deformazione in corrispondenza dei punti critici è sovrastimata): Fig.3a. Quando tale risultato viene poi utilizzato per valutare la durata LCF del componente sulla base della curva  $\Delta\varepsilon_t - N_f$  dedotta da quelle stesse prove, Fig. 3b, nasce un benefico effetto di compensazione dell'errore in quanto la curva  $\Delta\varepsilon_t - N_f$  è definita anch'essa con le deformazioni valutate per eccesso, cioè questa volta in modo conservativo.

Per cercare di verificare meglio tale asserzione si è scelto di effettuare un calcolo idealmente rappresentativo di un caso tipico di previsione di vita di un componente. Evitando l'impiego di metodi FEM, l'esempio ha riguardato il caso semplice di Fig.4. In tale geometria la posizione critica per la durata LCF è in

corrispondenza della radice dell'intaglio. Assumendo a titolo di esempio i seguenti (ragionevoli) valori:

sollecitazione nominale:  $\Delta S = 200 \text{ MPa}$

fattore nominale di concentrazione di sforzo:  $K_t = 4$

legame sforzo-deformazione:  $\Delta \epsilon_t = \Delta \sigma / 1.7 \cdot 10^5 + (\Delta \sigma / 1120)^{10}$

legame deformazione-vita:  $\Delta \epsilon_t = 3 N_f^{-0.9} + 10^{-2} N_f^{-0.2}$

e applicando la legge di Neuber in ipotesi di carico nominale in campo elastico:

$$\Delta \sigma \cdot \Delta \epsilon_t = (K_t \cdot \Delta S)^2 / E \quad (3)$$

( $E = 1.7 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ ) si calcola, per il fondo intaglio,  $\Delta \sigma = 740 \text{ MPa}$  e  $\Delta \epsilon_t = 2.03\%$ . A tale valore di deformazione corrisponde un numero di cicli a rottura  $N_f = 262$ . Si assuma che tali valori siano quelli esatti, di riferimento, e si introduca ora un fattore moltiplicativo 1.3 sulle deformazioni (ciò equivale a immaginare che il laboratorio abbia misurato le deformazioni con un errore in eccesso del 30%). Le curve LCF del materiale cambiano come segue:

legame sforzo-deformazione:  $\Delta \epsilon_t = \Delta \sigma / 1.31 \cdot 10^5 + (\Delta \sigma / 1091)^{10}$

legame deformazione-vita:  $\Delta \epsilon_t = 3.9 N_f^{-0.96} + 1.3 \cdot 10^{-2} N_f^{0.2}$

In questo caso si ottiene, a fondo intaglio,  $\Delta \sigma = 740 \text{ MPa}$  e  $\Delta \epsilon_t = 2.64\%$ ; la corrispondente vita è  $N_f = 262$ . E' interessante rilevare che la vita si mantiene invariata, così come pure il valore della sollecitazione sull'intaglio, mentre la deformazione è aumentata proprio del 30%. Viene naturale sospettare che tale risultato abbia validità generale, che esistano cioè ragioni di fondo legate alla struttura matematica del problema per un simile risultato; peraltro rimane il dubbio che in tutto ciò giochi anche l'aver impiegato la legge di Neuber, anziché un metodo più generale.

Si è cercato quindi di esaminare la struttura teorica del problema del calcolo della vita LCF di un componente, a prescindere da aspetti particolari. Il problema è quello di un corpo solido per il quale occorre determinare in ogni punto, e in particolare nel punto di massima sollecitazione  $P_0$ , i valori di sforzo, deformazione e vita, mediante soluzione di un sistema di equazioni differenziali. Evitando per semplicità la notazione tensoriale esatta, in favore di una notazione meno rigorosa ma forse più espressiva almeno per i non addetti ai lavori (fra i quali vi sono gli autori di questa nota), il sistema in questione è il seguente (si tralasciano anche i simboli che indicano le grandezze cicliche):

$$\begin{aligned} f(\sigma) &= 0 \\ g(\epsilon) &= 0 \\ \sigma &= h(\epsilon) \\ c(\sigma) &= 0 \\ N_f &= l(\epsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

dove:

$f(\sigma)$  indica l'insieme delle equazioni di equilibrio,  
 $g(\varepsilon)$  indica l'insieme delle equazioni di congruenza,  
 $\sigma=h(\varepsilon)$  rappresenta il legame sforzi-deformazioni,  
 $c(\sigma)$  definisce le condizioni al contorno per i carichi,  
 $l(\varepsilon)$  definisce la curva deformazione-vita,

Nel punto  $P_0$  (di massima sollecitazione) sul componente la soluzione del sistema (4) sia:  $\sigma = \sigma_0$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0$ ,  $N_f = N_{f0}$ . Si consideri ora la seguente trasformazione che lega le variabili  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $N_f$  alle variabili  $\sigma'$ ,  $\varepsilon'$ ,  $N_f'$ :

$$\sigma = \sigma' \quad \varepsilon = F(\varepsilon') \quad N_f = N_f' \quad (5)$$

essendo:

$$F(\varepsilon') = A \varepsilon'^2 + B \varepsilon' + C \quad (6)$$

$F$  esprime la discrepanza fra un primo e un secondo laboratorio che, a parità di vita e di carico, misurano valori diversi per le deformazioni. In base ai dati del secondo laboratorio l'analisi di previsione di vita del componente è basata sulla soluzione del nuovo sistema:

$$\begin{aligned} f(\sigma') &= 0 \\ g(\varepsilon') &= 0 \\ \sigma' &= h'(\varepsilon') \\ c(\sigma') &= 0 \\ N_f' &= l'(\varepsilon') \end{aligned} \quad (7)$$

Si consideri che valgono le identità:

$$\begin{aligned} h'(\varepsilon') &= \sigma' = \sigma = h(\varepsilon) = h[F(\varepsilon')] \\ l'(\varepsilon') &= N_f' = N_f = l(\varepsilon) = l[F(\varepsilon')] \end{aligned} \quad (8)$$

e che inoltre le equazioni di congruenza fra le deformazioni (equazioni differenziali omogenee alle derivate seconde) sono invarianti per la trasformazione  $F$ :

$$g(\varepsilon') = g[F(\varepsilon')] \quad (9)$$

Il sistema di equazioni (7) diventa:

$$\begin{aligned} f(\sigma') &= 0 \\ g[F(\varepsilon')] &= 0 \\ \sigma' &= h(F(\varepsilon')) \\ c(\sigma') &= 0 \\ N_f' &= l[F(\varepsilon')] \end{aligned} \quad (10)$$

Si noti che il sistema (10) è identico al sistema (4): vi compaiono le stesse funzioni  $f$ ,  $g$ ,  $h$ ,  $c$ ,  $l$ , solo applicate a variabili con nomi diversi. Dunque si conclude che nel punto  $P_0$  il sistema (10) ha, nelle nuove variabili  $\sigma'$ ,  $F(\varepsilon')$ ,  $N_f'$ , la stessa soluzione che aveva il sistema (4):  $\sigma' = \sigma_0$ ,  $F(\varepsilon') = \varepsilon_0$  (e dunque  $\varepsilon' = F^{-1}(\varepsilon_0)$ ),  $N_f' = N_{f0}$ . L'unica diversità riguarda il valore della deformazione, ma il carico e la vita a fatica sono previsti identici.

Risulta così dimostrato che la vita di un componente valutata

a partire (i) da un calcolo elastoplastico che utilizza una curva sperimentale sforzo-deformazione e (ii) da una curva sperimentale deformazione-vita, ambedue le curve affette dagli stessi errori sulle deformazioni (è il caso di curve provenienti dall'elaborazione di una stessa serie di dati, prodotti dallo stesso laboratorio), è insensibile a tali errori. L'insensibilità è totale nel caso che le deformazioni errate siano esprimibili come una funzione polinomiale di grado  $\leq 2$  della deformazione vera; solo le componenti di errore di grado più elevato possono avere influenza sulla correttezza della previsione di vita.

## CONCLUSIONI

1. Le differenze fra i risultati delle prove LCF condotte dai 26 laboratori che hanno partecipato al Round Robin sono rilevanti, come era da attendersi. I risultati prodotti dal CISE si collocano bene entro la variabilità generale.

2. Vi è scetticismo fra gli esperti di LCF sulla possibilità che la notevole disuniformità dei risultati fra laboratori diversi possa essere efficacemente ridotta, per esempio tramite una normativa che lasci meno margini di libertà nel modo di condurre le prove, o con l'adozione di procedure più stringenti di controllo di qualità. E' d'altra parte evidente che l'affidabilità delle previsioni di vita LCF dei componenti ricavate da calcoli che utilizzano dati del materiale affetti da simili incertezze non può in generale che essere scarsa. Tuttavia è possibile concludere con una affermazione più favorevole. Infatti, nelle ipotesi che:

- i) la variabilità dei risultati delle prove sia dovuta prevalentemente a errori di misura della deformazione sui provini (come generalmente si ritiene essere il caso), e
- ii) si impieghino, nel calcolo del componente, curve sforzo-deformazione e deformazione-vita errate ma congruenti (dove per congruenti si intende prodotte dallo stesso laboratorio, che ha analizzato una stessa serie di prove per ricavare entrambe le curve),

allora la previsione di vita del componente risulta sostanzialmente immune da tali incertezze, mentre l'inaffidabilità riguarda solo i valori calcolati delle deformazioni.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] G.B. Thomas (NPL) and C. Amzallag (UNIREC), "Constant Amplitude LCF Testing Guidelines for a Comparative Programme", prepared for CEC-BCR
- [2] V. Bicego, M. Sciamanna, F. Crociani, "Intercomparison of Low Cycle Fatigue Measurements: Results of CISE Tests on AISI 316L, 9CrMo and Nil01", CISE Report 4433, May 1988
- [3] G.B. Thomas and R.K. Varma, "Evaluation of Low Cycle Fatigue Test Data in the BCR-VAMAS Intercomparison Programme", NPL Report DMD(D)50, November 1990

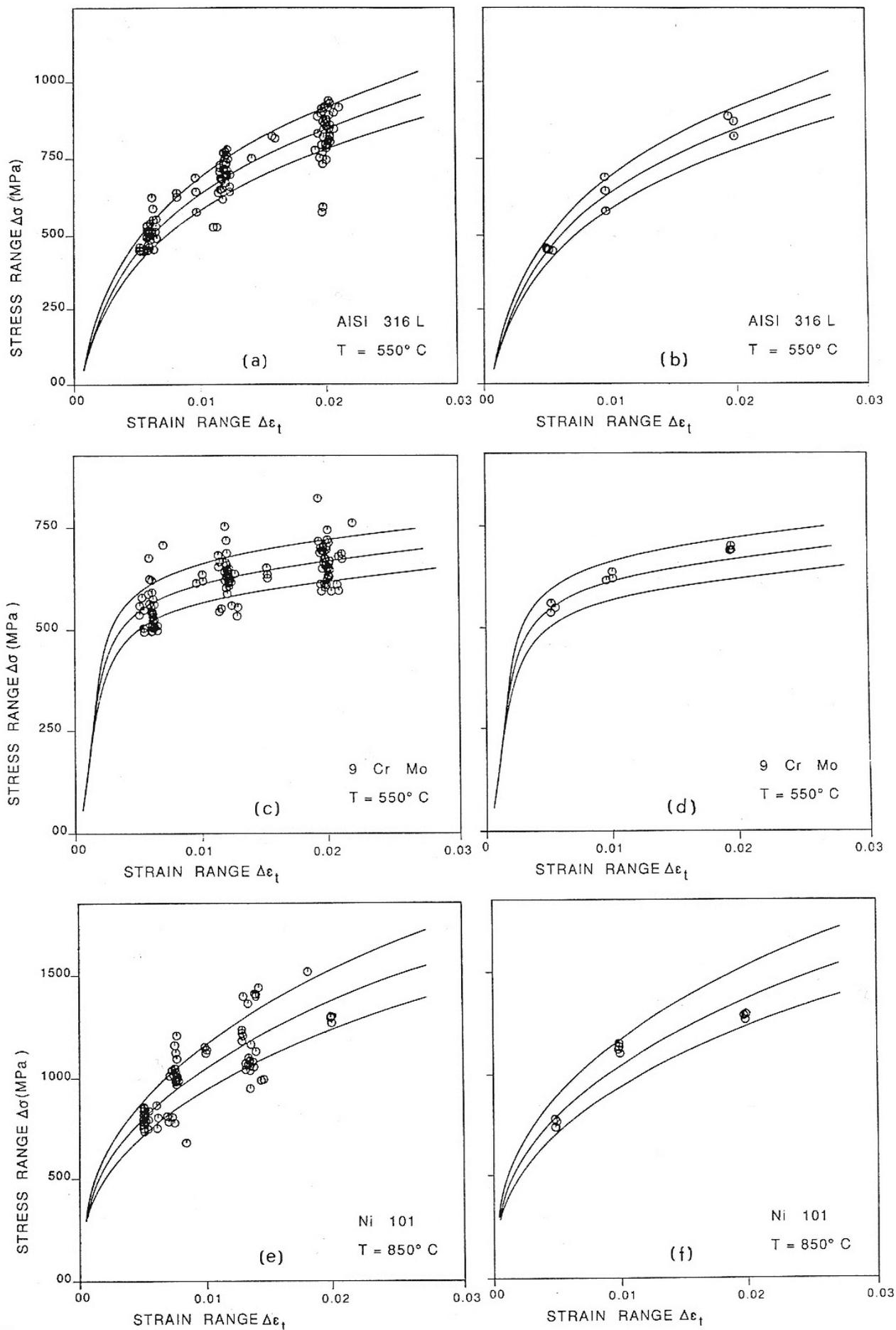


Fig.1 Risultati sforzo-deformazione ciclici:  
 (a, c, e) di tutti i laboratori, (b, d, f) del CISE.  
 Le curve individuano le bande di variabilità entro la  
 dispersione standard.

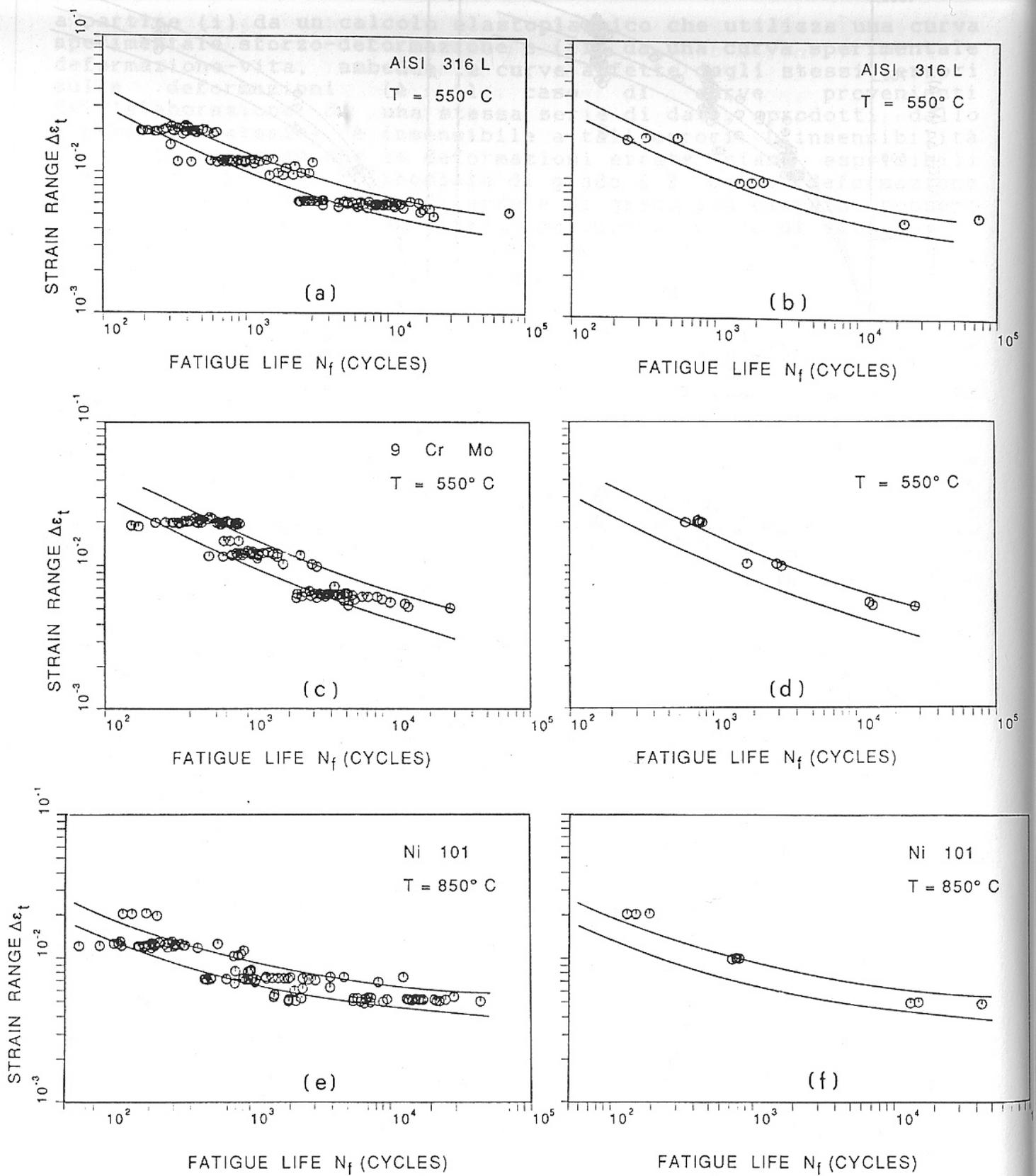


Fig. 2 Risultati deformazione-vita a fatica: (a, c, e) di tutti i laboratori, (b, d, f) del CISE. Le curve individuano le bande di variabilità entro la dispersione standard.

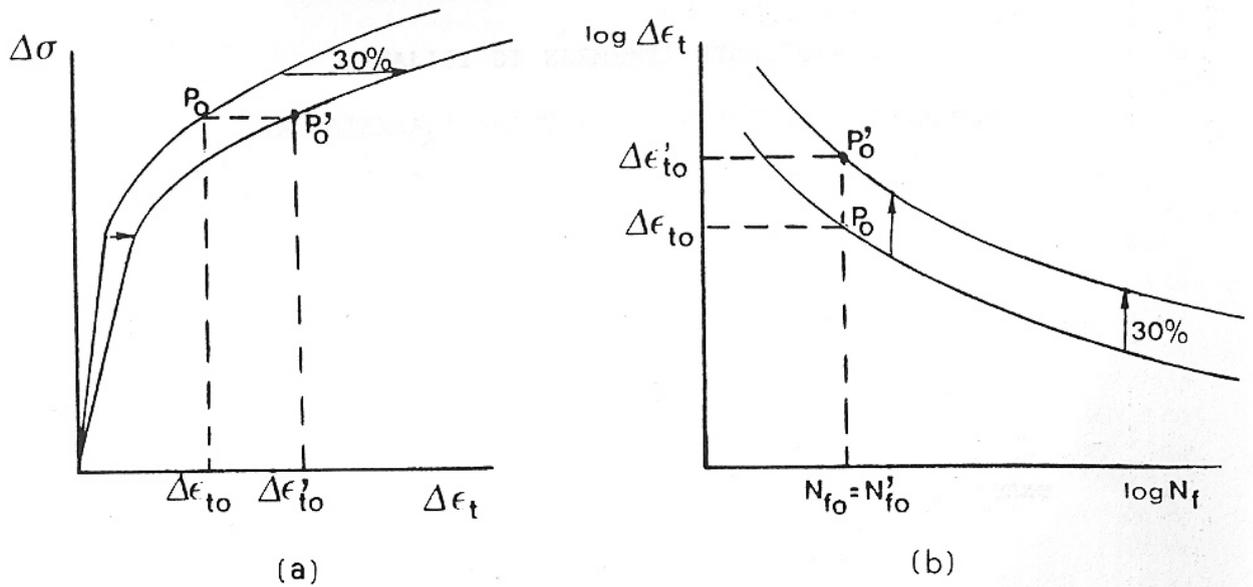
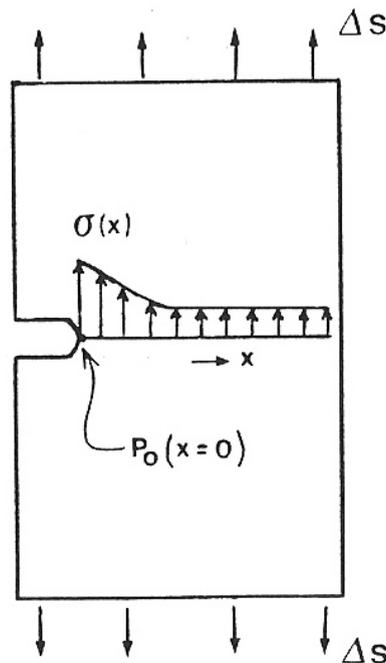


Fig. 3 Esempificazione dell'effetto sulla valutazione della vita a fatica di errori sistematici nella misura della deformazione in prove LCF;  
 (a) curva sforzo-deformazione ciclica  
 (b) curva deformazione-vita.



$$K_t = 4$$

$$\Delta S = 200 \text{ MPa}$$

$$\text{in } P_0: \Delta \sigma \Delta \epsilon_t = (K_t \Delta S)^2 / E$$

Fig. 4 Applicazione della regola di Neuber ad un caso con geometria semplice.