

## 11 Fatica dei materiali

### 11.1 GENERALITÀ

Il fenomeno della fatica consiste nella rottura di pezzi sottoposti a sollecitazioni cicliche, anche se in nessun momento del ciclo si è raggiunta la tensione di rottura.

#### 11.1.1 PROVE DI FATICA

Definizioni:

- **Prove statiche** sono quelle in cui il carico aumenta gradualmente con bassa velocità (circa  $1 \text{ Mpa s}^{-1}$ ) fino a rottura;
- **Prove dinamiche** sono quelle in cui l'aumento del carico è molto veloce (circa  $10^5 \text{ Mpa s}^{-1}$ ), per esempio prove di resilienza;
- **Prove di fatica** sono quelle in cui il carico, variando con velocità medio-alta (circa  $10^3 \text{ Mpa s}^{-1}$ ) ha un andamento oscillante tra un massimo e un minimo.

Per caratterizzare un carico di fatica importa indicare il carico massimo, quello minimo e il numero di alternanze. Ragionando in termini di tensione  $\sigma$ , si possono assegnare due dei seguenti cinque parametri:

- 1) e 2)  $\sigma_{max}$  e  $\sigma_{min}$
- 3) e 4) Il valor medio  $\sigma_m$  e l'ampiezza  $\sigma_a$  dell'onda di tensione

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

- 5) Il rapporto di tensione  $R$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

In base ai valori dei precedenti parametri si distinguono prove:

- **alterno simmetriche** se  $\sigma_{min} = -\sigma_{max}$  e quindi  $\sigma_m = 0$  ed  $R = -1$ ;
- **alterno asimmetriche** se  $\sigma_{min} \neq -\sigma_{max}$ ; in questo caso si ha  $-1 < R < 0$  se il carico prevalente è di trazione e  $R < -1$  se il carico prevalente è di compressione (tali ultime prove sono però poco usate).
- **dallo zero** se  $\sigma_{min} = 0$  e quindi  $R = 0$  (poco usato il caso a compressione  $\sigma_{max} = 0$ ,  $R = \infty$ ),
- **pulsanti** se  $\sigma_{min}$  e  $\sigma_{max}$  hanno lo stesso segno (quasi sempre si effettuano prove in trazione per cui essi sono positivi); si ha  $0 < R < 1$  se sono di trazione e  $r > 1$  se sono di compressione.

Lo stesso dicasi *mutatis mutandis* se la tensione variabile è una tensione tangenziale.

La forma d'onda non ha importanza, per cui di solito essa viene scelta secondo l'opportunità (sinusoidale o a onda trapezia o triangolare o altro); neppure la frequenza è importante per cui si utilizza la frequenza più alta permessa dalla macchina.

In base al tipo di sollecitazione si distinguono prove a trazione-compressione, a flessione statica, a flessione rotante e a torsione alternata.

Le macchine utilizzate sono delle normali macchine di prova universali (in questo caso la frequenza delle alternanze è al massimo sui 10 Hz) o macchine speciali dette vibrofori, fondate sulla risonanza di un sistema massa-molla (frequenza fino a 500 Hz). Per le prove di flessione rotante basta un semplice asse in rotazione, mosso da un motore elettrico, facendo eventualmente uso di un moltiplicatore di giri (tanto, la potenza assorbita è trascurabile).

### 11.1.2 ASPETTO DELLA ROTTURA PER FATICA

La rottura per fatica si presenta suddivisa in due parti, l'una liscia, di forma semicircolare, quasi sempre dotata di striature concentriche e l'altra irregolare come una rottura fragile. La prima corrisponde all'avanzamento stabile della cricca, la seconda alla rottura finale di schianto (avanzamento instabile). Non vi sono mai segni evidenti di strizione, nemmeno nei materiali più duttili.

L'innescò è sempre sulla superficie libera; in genere quella esterna, ma anche sulla superficie di porosità o soffiature interne, mai vi è innescò da un punto interno non precedentemente lesionato.

### 11.1.3 STUDIO DEL COMPORTAMENTO A FATICA

Si riassume nel diagramma del Wöhler (fig. 54), che porta in ascisse il logaritmo del numero dei cicli a rottura e in ordinate il logaritmo della  $\sigma_a$ . Ogni diagramma è tracciato per un valore particolare di  $\sigma_m$  ma in pratica quello più usato è quello con  $\sigma_m = 0$ .

Ogni punto del diagramma rappresenta un provino. I punti si trovano sparpagliati su due fasce, una decrescente e l'altra orizzontale posta sul proseguimento della prima per alti valori del numero di cicli. La notevole dispersione è dovuta al fatto che la fase di nucleazione della cricca dipende da molti fattori oltre che dal carico; la fase di propagazione è invece assai più deterministica ma incide poco sulla durata totale.

Con metodi statistici si tracciano sul diagramma due linee, una inclinata e l'altra orizzontale, corrispondenti alla mediana delle due fasce; la prima è relativa alla resistenza a fatica finita e la seconda alla resistenza a fatica infinita (limite di fatica). Talvolta si traccia anche una terza retta per bassi valori del numero di cicli, corrispondente alla fatica oligociclica, che non tratteremo.

L'ordinata della retta orizzontale viene detto limite di fatica indicato con  $\sigma_L(\sigma_m)$ . se  $\sigma_m = 0$  il limite si indica con  $\sigma_{La}$ .

Per alcuni materiali, in particolare per le leghe leggere (leghe di alluminio) il limite di fatica è molto basso e viene raggiunto per valori altissimi di  $N$ , cioè di  $10^8 - 10^9$ .

Il diagramma di  $\sigma_L$  in funzione di  $\sigma_m$  si chiama diagramma di Haigh-Soderberg. Esso si presenta con la concavità rivolta verso il basso. Nel primo quadrante si approssima con una retta passante per i punti  $A(0, \sigma_{La})$  ed  $R(\sigma_R, 0)$ .

La costruzione del diagramma di Haigh-Soderberg a partire da una serie di diagrammi di Wöhler, ottenuti a diversi valori del precarico, è mostrata in fig. 55. Nella successiva fig 56 si vede il passaggio dai punti sperimentali (ciascuno rappresentante il limite di fatica per un diagramma di Wöhler) ad una serie di curve approssimanti. Quella da noi usata sarà la retta di Goodman (linea 1 del diagramma)

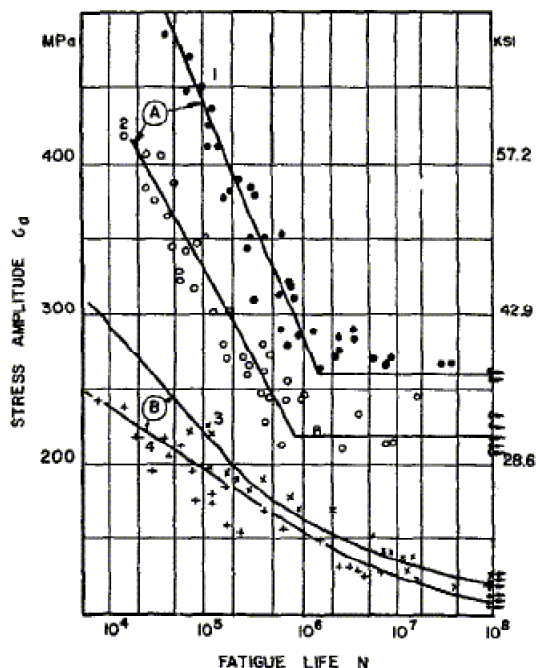


Figura 54: Diagramma del Wöhler per leghe Fe-Ni. A - Strutture cubiche a corpo centrato. B - Strutture cubiche a facce centrate 1 - Fe-10% Ni, temprato 2 - Fe-3% Ni-0.5% Ti 3 - Ni 4 - Ni-15% Fe. Da Ferro e Montalenti, 1954.

Lo stesso contenuto di informazione è presente nel diagramma di Goodman-Smith (fig. 57), nel quale sono tracciate le linee di  $\sigma_{max\ limite} = \sigma_m + \sigma_L(\sigma_m)$  e  $\sigma_{min\ limite} = \sigma_m - \sigma_L(\sigma_m)$  in funzione di  $\sigma_m$ . Questo diagramma è però più complesso per cui non sarà utilizzato in questo corso.

Nel diagramma di Haigh-Soderberg si rappresenta un carico di fatica mediante un punto; se questo cade al di sotto della linea di resistenza a fatica vuol dire che l'organo sottoposto a quel carico non si rompe per fatica. Nel seguito, lo studio della fatica sarà suddiviso in tre capitoli che seguono l'evoluzione storica dell'argomento: dapprima considereremo il caso della resistenza a limite di fatica, che ipotizza una durata infinita del pezzo; nel secondo il caso della resistenza a fatica, che tollera una durata finita e se ne sforza di calcolare i parametri; nel terzo la propagazione della cricca di fatica, che ammette che un pezzo possa essere originariamente difettato, ma che sia ancora conservato in opera.

#### 11.1.4 FATTORI CHE INFLUENZANO LA FATICA

Sono l'effetto d'intaglio, l'effetto finitura superficiale e l'effetto grandezza.

L'effetto d'intaglio si riassume nel fatto che il comportamento a fatica di provini intagliati è peggiore di quello dei corrispondenti provini non intagliati, ovviamente a parità di forze applicate e di sezione minima. Si ha infatti un abbassamento del limite di fatica anche se il carico di rottura non varia (per materiali duttili).

Il rapporto

$$K_f = \frac{\sigma_{La}(\text{non intagliato})}{\sigma_{La}(\text{intagliato})}$$

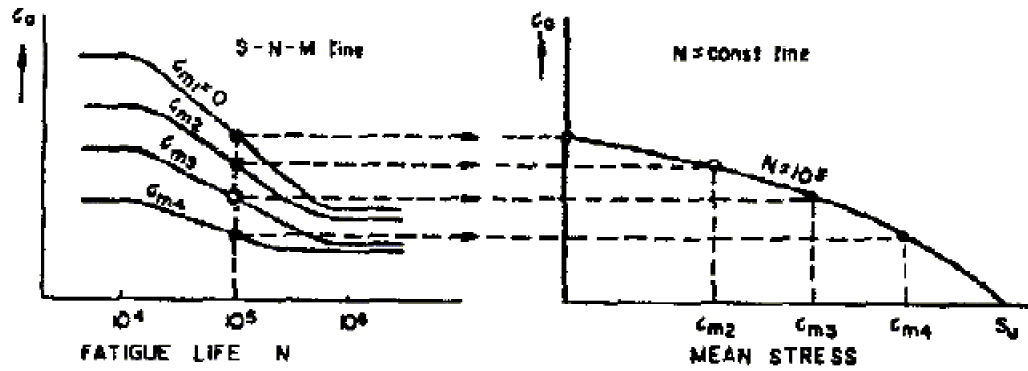


Figura 55: Costruzione del diagramma di Haigh-Soderberg. Qui è mostrata la costruzione della linea  $N = \text{cost.} = 10^5$ , ma ovviamente il procedimento è lo stesso anche per la curva limite di fatica.

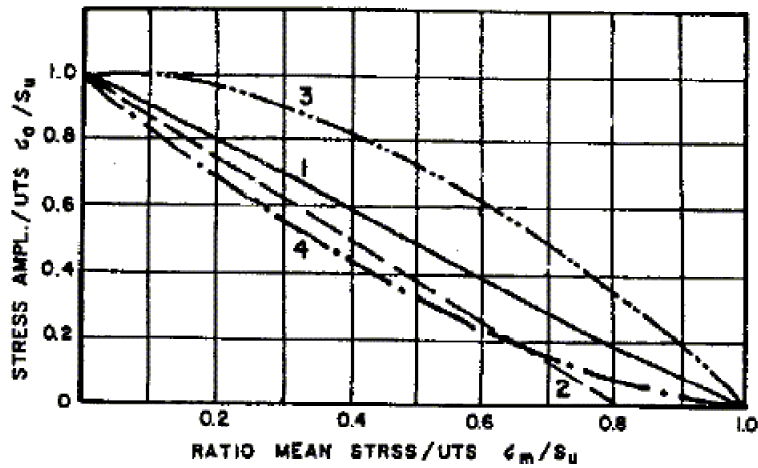


Figura 56: Diagramma di Haigh-Soderberg semplificato secondo varie procedure: 1 - retta di Goodman; 2 - retta di Soderberg; 3 - curva di Gerber; 4 - curva di Smith, usata per materiali fragili

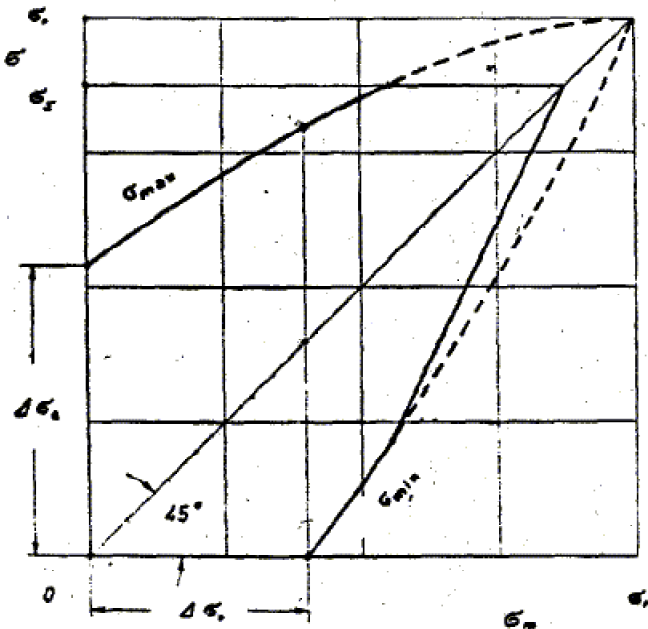


Figura 57: Diagramma di Goodman-Smith

prende il nome di *fattore d'intaglio a fatica* e si può ovviamente ricavare sperimentalmente, anche se di solito si determina con la formula

$$(1 - K_f) = q(1 - K_t)$$

in cui  $K_t$  è il *fattore teorico d'intaglio*, ed è un fattore solo geometrico, per il quale si veda l'apposito capitolo, e  $q$  è la *sensibilità all'intaglio*, che è una caratteristica del materiale.

La sensibilità all'intaglio si trova nell'apposito abaco (fig. 58) in funzione della  $\sigma_R$ , o meglio della durezza Brinell HB che ad essa è proporzionale, e del raggio  $\rho$  in gola all'intaglio.

Questo abaco, che essenzialmente deve essere ritenuto sperimentale, può essere interpretato in termini della teoria di Neuber dell'intaglio limite, secondo la quale

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\rho'/\rho}}$$

essendo  $\rho'$  una proprietà del materiale a sua volta funzione del carico di rottura (fig 59).

Il significato fisico della teoria di Neuber è che un intaglio di raggio inferiore a  $\rho'$  viene visto dal materiale come uno spigolo 'acuto' (di raggio nullo), per cui per esso cade in difetto la consueta trattazione della teoria elastica e occorre procedere a considerazioni energetiche, come si era fatto per la meccanica della frattura.

Gli altri due effetti che influenzano la fatica, effetto grandezza ed effetto finitura superficiale, sono espressi da appositi fattori, indicati rispettivamente con  $C_D$  e  $C_S$ , che si ricavano da appositi abachi (figg 60 e 61. Questi ultimi sono solo sperimentali e non se ne conoscono formule interpolanti.

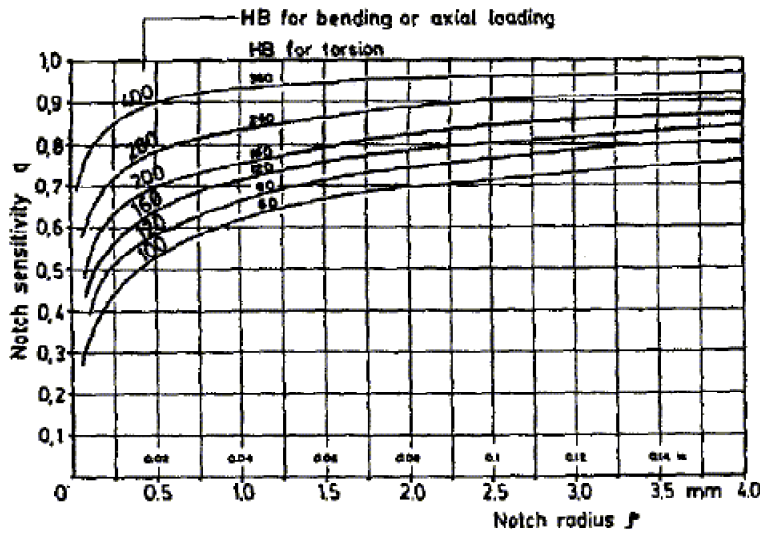


Figura 58: Sensibilità all'intaglio  $q$  in funzione del raggio  $\rho$  di gola dell'intaglio per acciai con varie durezza Brinell (HB), secondo il metodo di Neuber-Kuhn.

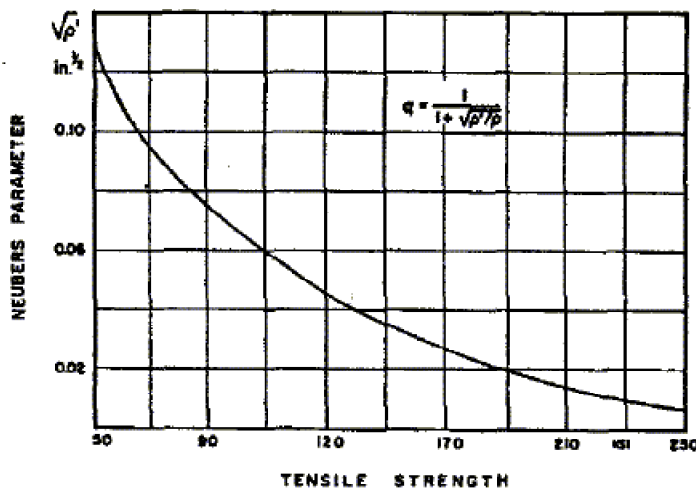


Figura 59: Parametro di Neuber  $\rho'$  in funzione della tensione di rottura di acciai.

L'effetto finitura superficiale è legato alla rugosità della superficie e si ritiene originato dai microintagli che gli utensili lasciano alla superficie del pezzo.

L'effetto grandezza è invece probabilmente dovuto al fatto che ad un pezzo più grande corrisponde una maggiore superficie e questa ad una maggiore probabilità che vi sia già presente un microintaglio o un difetto superficiale.

#### 11.1.5 TRATTAMENTI DI RULLATURA E DI PALLINATURA

Sono due trattamenti superficiali volti a innalzare il limite di fatica, ma usati anche nel campo della durata finita per migliorare la resistenza a fatica.

Il trattamento di rullatura consiste nel lisciare la superficie dei pezzi cilindrici tramite la forte pressione esercitata da tre rulli disposti simmetricamente. L'effetto benefico è dovuto soprattutto al fatto che si generano in superficie delle tensioni residue di compressione che tendono a chiudere le eventuali cricche di fatica che si dovessero formare, o perlomeno ad ostacolarne la propagazione.

Il trattamento di pallinatura consiste nel colpire la superficie del pezzo, in questo caso di forma qualsiasi, con un getto di palline di acciaio indurito. Anche in questo caso si fa affidamento sulle tensioni residue generate nei microcrateri di impatto.

