

## Calcolo a fatica di componenti meccanici

### Prima parte

#### Calcolo a fatica di componenti meccanici

L'esperienza, nella pratica costruttiva, di rotture improvvise, dovute a carichi che si ripetono ciclicamente, è ormai secolare.

Tuttavia, solo quando il metallo ha iniziato a sostituire significativamente il legno, come materiale da costruzione, ci si è resi conto pienamente dell'importanza del fenomeno e delle gravi conseguenze che esso può comportare.

La reale comprensione del fenomeno è relativamente recente ed ancora oggi non si può affermare che essa sia completa.

I primi studi sul fenomeno della fatica sono stati fatti in Germania, dove nel 1829 un ingegnere minerario tedesco, W. A.S. Albert, effettuò alcuni esperimenti di carico ripetuto su catene di acciaio.

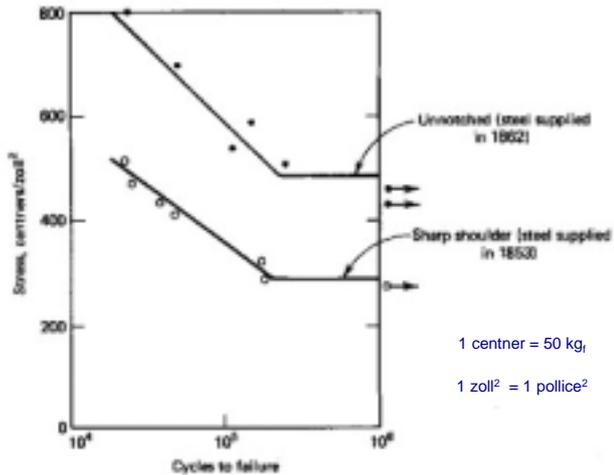
Primi studi sperimentali

Tra il 1852 ed il 1870 un ingegnere ferroviario tedesco, August Wöhler, condusse i primi esperimenti sistematici sul fenomeno della fatica, per indagare su alcune inspiegabili rotture in esercizio di assili ferroviari.

Appariva sorprendente, infatti, che tali rotture avvenissero ben al di sotto del limite elastico del materiale.

Wöhler condusse prove di fatica sia in scala reale sugli assili ferroviari, che su provini di dimensioni ridotte.

Qui di fianco sono riportati i dati che egli ottenne nei suoi primi esperimenti.

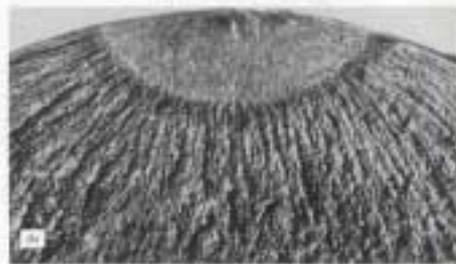
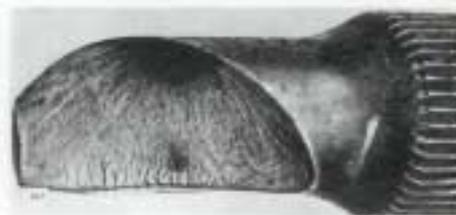


Danno di fatica

La fatica può essere definita come un fenomeno di danneggiamento progressivo del materiale che inizia con una fase di nucleazione di un microscopico cretto e che procede con una fase di propagazione del difetto fino a dimensioni critiche, tali da provocare la rottura di schianto.



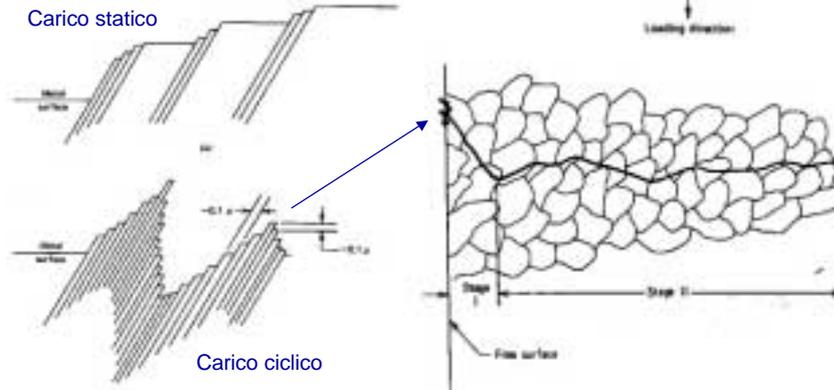
Rottura di un tirante con filettatura a sezione rettangolare. La rottura ha avuto innesco nella zona indicata con A



Rottura per torsione di un albero →

Danno di fatica

La fatica può essere definita come un fenomeno di danneggiamento progressivo del materiale che inizia con una fase di nucleazione di un microscopico cretto e che procede con una fase di propagazione del difetto fino a dimensioni critiche, tali da provocare la rottura di schianto.



Bande di scorrimento in un materiale duttile dovute all'applicazione di un carico.

Le inversioni di carico nella sollecitazione ciclica sono all'origine alla fase di nucleazione.

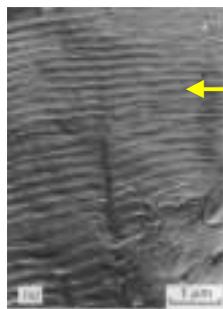
Nella fase di propagazione il difetto si accresce fino alle dimensioni critiche.

Danno di fatica

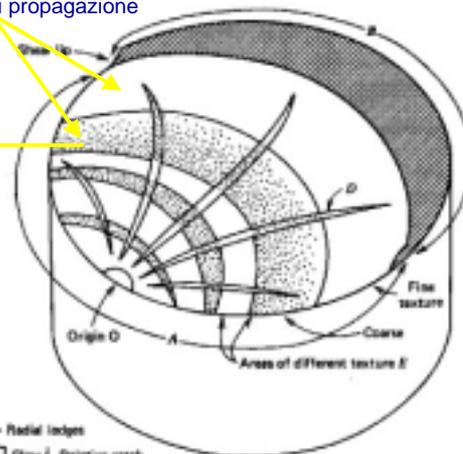
La fatica può essere definita come un fenomeno di danneggiamento progressivo del materiale che inizia con una fase di nucleazione di un microscopico cretto e che procede con una fase di propagazione del difetto fino a dimensioni critiche, tali da provocare la rottura di schianto.

Rappresentazione schematica di una superficie di rottura per fatica

Ad ogni ciclo di carico corrisponde un striatura che indica un ulteriore avanzamento del fronte di propagazione della cricca.



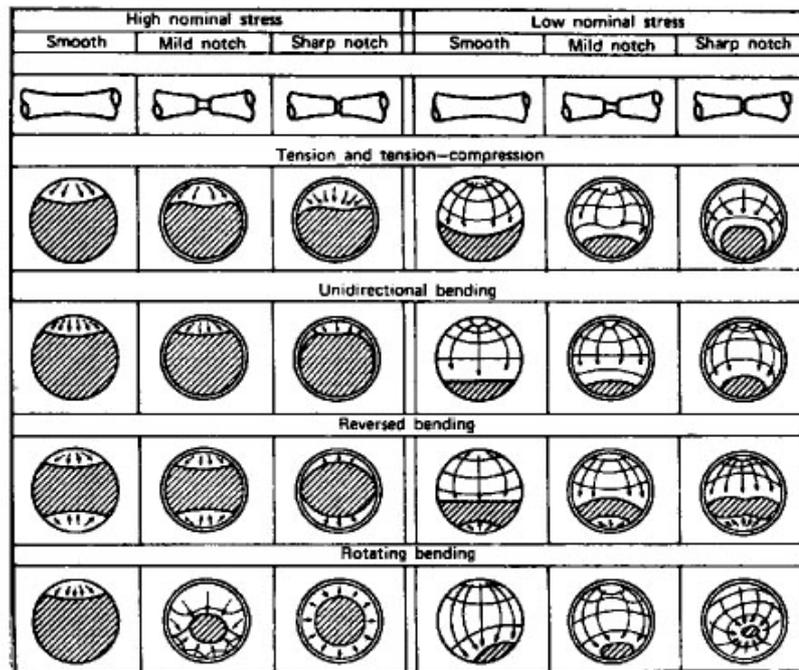
Zone di propagazione



A diverse ampiezze di carico ciclico corrispondono diverse velocità di propagazione.

D = Radial ledges  
 [Fine texture] Slow / Relative crack growth rates  
 [Coarse texture] Fast / growth rates  
 [Final fracture] Final fracture

Superfici di rottura



Il progetto di un componente sollecitato a fatica.

Come progettare un componente sollecitato a fatica?

Esistono due possibili modi di procedere:

Il primo, che si potrebbe definire "classico" e che non si discosta molto concettualmente dalla prima impostazione che Wöhler diede al problema, consiste nel mettere in relazione la durata del componente, intesa come numero di cicli sopportabili, prima di giungere alla rottura, con lo stato di sollecitazione agente sul componente stesso, basandosi sul confronto con dati sperimentali (curve di Wöhler).

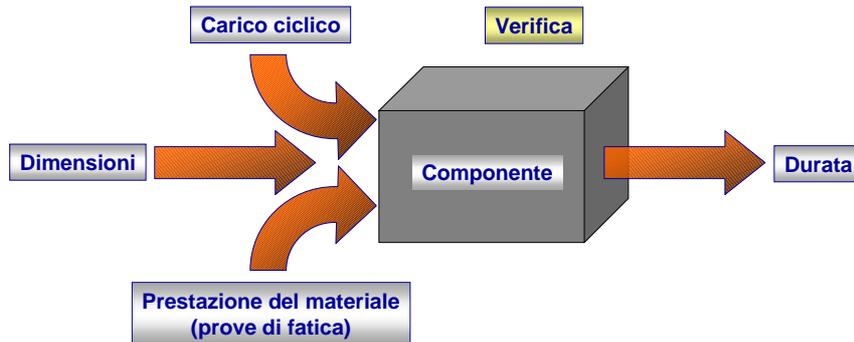
Il secondo, che potrebbe essere definito come un "approccio locale" al problema, focalizza l'attenzione sul difetto e sulle condizioni al contorno che ne determinano l'accrescimento fino alle dimensioni critiche, mettendole in relazione con i carichi agenti e le caratteristiche di resistenza a frattura del materiale.

Il progetto di un componente sollecitato a fatica.

Come progettare un componente sollecitato a fatica?

“Metodologia basata sulla curva di Wöhler”

Questa procedura considera il componente una sorta di “scatola nera” nella quale si inseriscono informazioni ed escono previsioni sulla vita a fatica, basandosi sul paragone con ciò che si osserva sperimentalmente in casi analoghi, senza che siano noti i meccanismi che agiscono all’interno della scatola.

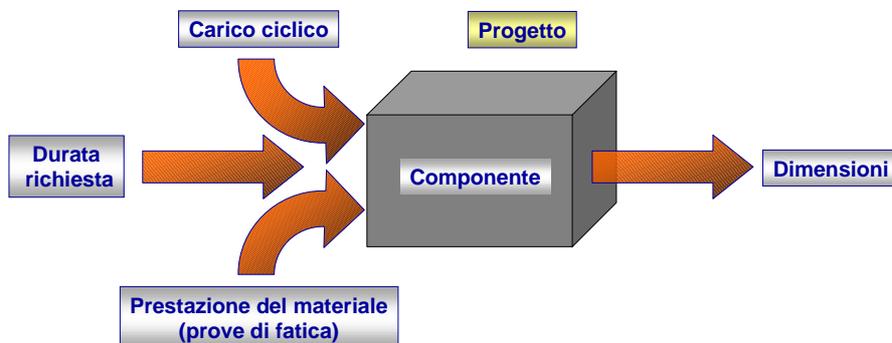


Il progetto di un componente sollecitato a fatica.

Come progettare un componente sollecitato a fatica?

“Metodologia basata sulla curva di Wöhler”

Questa procedura considera il componente una sorta di “scatola nera” nella quale si inseriscono informazioni ed escono previsioni sulla vita a fatica, basandosi sul paragone con ciò che si osserva sperimentalmente in casi analoghi, senza che siano noti i meccanismi che agiscono all’interno della scatola.

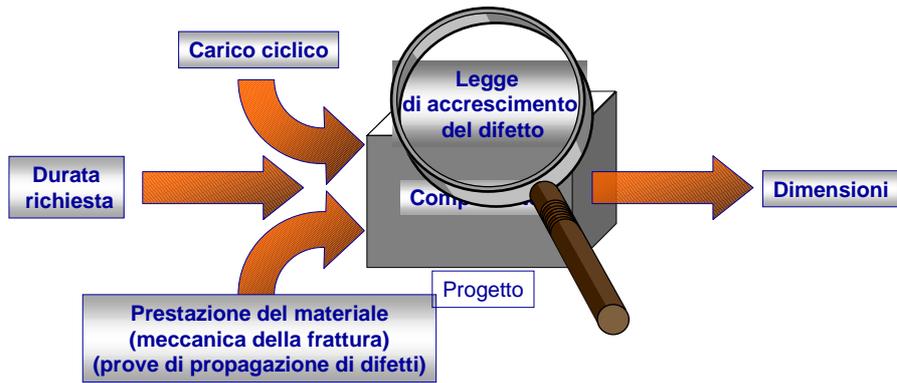


Il progetto di un componente sollecitato a fatica.

Come progettare un componente sollecitato a fatica?

“Approccio locale - Meccanica della frattura”

Questa procedura prevede la vita a fatica del componente tramite una legge di accrescimento di un difetto, preesistente nel componente, del quale si ipotizza posizione, forma e dimensione. In altri termini è come mettere in luce il meccanismo interno di danneggiamento del componente.



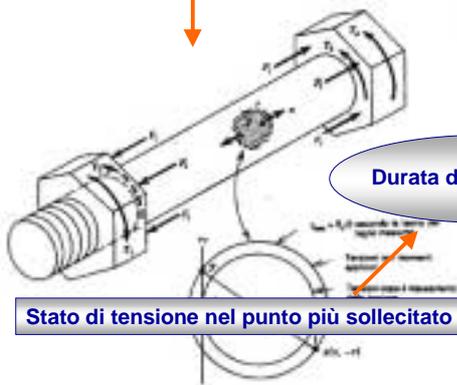
Il progetto di un componente sollecitato a fatica.

Come progettare un componente sollecitato a fatica?

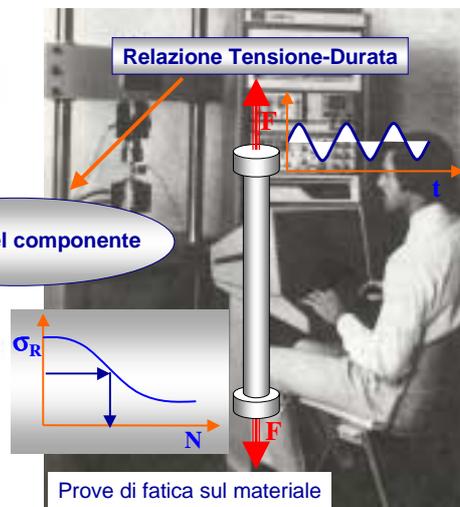
“Procedura classica”

Non c'è alcuna ipotesi sulla dimensione e sulla posizione di eventuali difetti nel componente!

Calcolo dello stato di tensione del componente



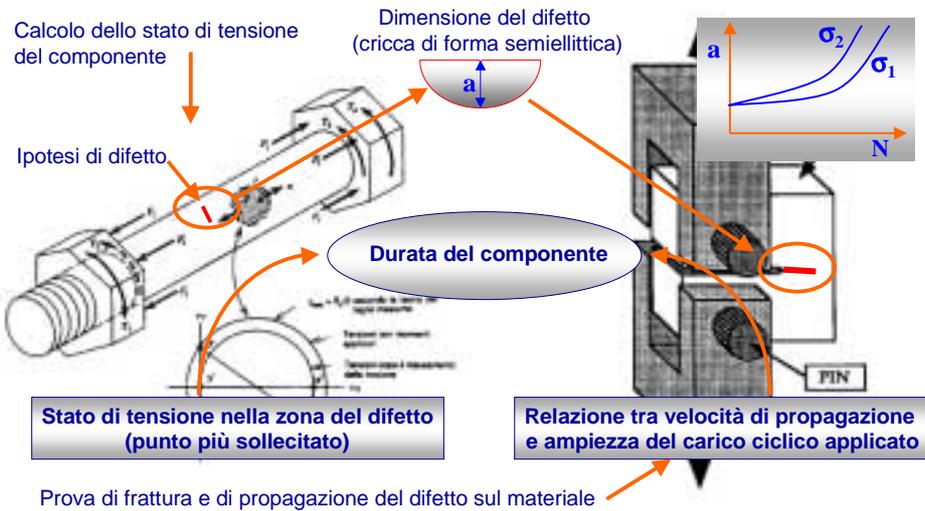
Relazione Tensione-Durata



Il progetto di un componente sollecitato a fatica.

Come progettare un componente sollecitato a fatica?

“Approccio locale - Meccanica della frattura”



Il progetto di un componente sollecitato a fatica.

Come progettare un componente sollecitato a fatica?

La procedura “classica” per prevedere la vita a fatica di un componente è ancora oggi il modo di procedere largamente impiegato per il progetto e la verifica a fatica degli organi meccanici.



Semplicità di applicazione

Possibilità di ridurre al minimo i dati sperimentali necessari

Accettabile livello di affidabilità della previsione di vita

Calcolo a fatica: nomenclatura

Calcolo a fatica: nomenclatura

Si sottoponga una barra a sezione circolare piena ad un carico assiale ciclico di trazione compressione.

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A} \quad \sigma_{\min} = \frac{F_{\min}}{A}$$

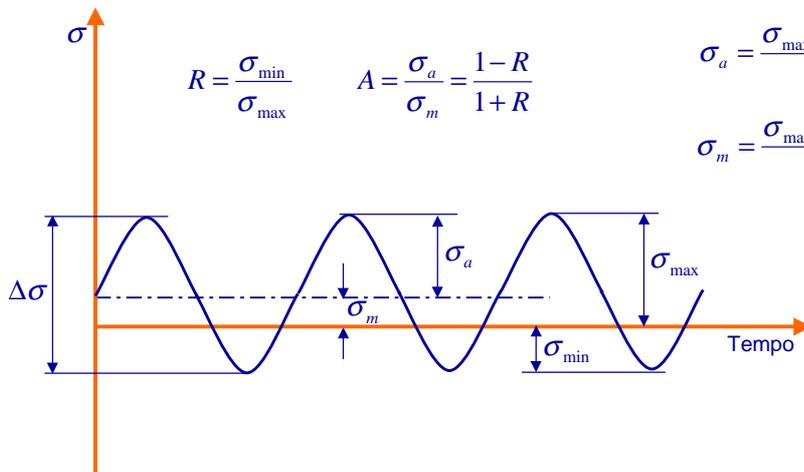


$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R}$$

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

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



Calcolo a fatica: nomenclatura

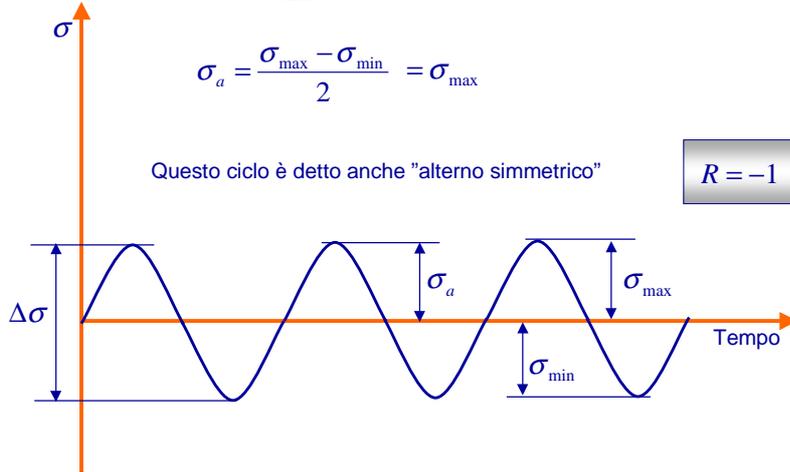
Se  $F_{\min} = -F_{\max}$  allora si ha un ciclo a media nulla:  $\sigma_m = 0 \rightarrow \sigma_{\min} = -\sigma_{\max}$

ed inoltre:  $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1 \quad A = \frac{1-R}{1+R} = \infty$

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

Questo ciclo è detto anche "alterno simmetrico"

$R = -1 \quad A = \infty$

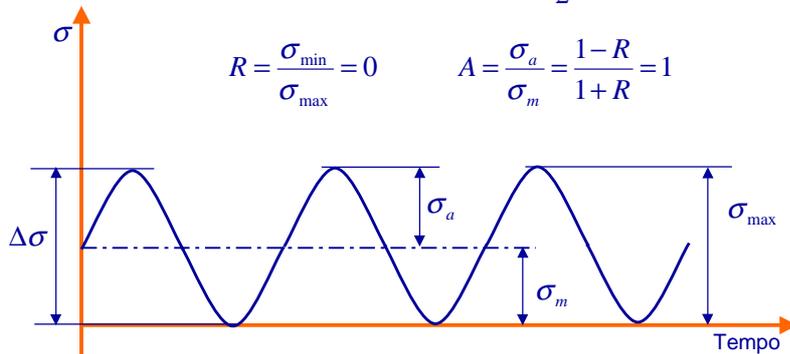


Calcolo a fatica: nomenclatura

Se  $F_{\min} = 0$  allora si ha:  $\sigma_{\min} = 0 \quad \sigma_m = \sigma_a$

ed inoltre:  $\sigma_{\max} = \Delta\sigma \rightarrow \sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2}$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0 \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} = 1$$



Questo ciclo è detto "ciclo dallo 0"

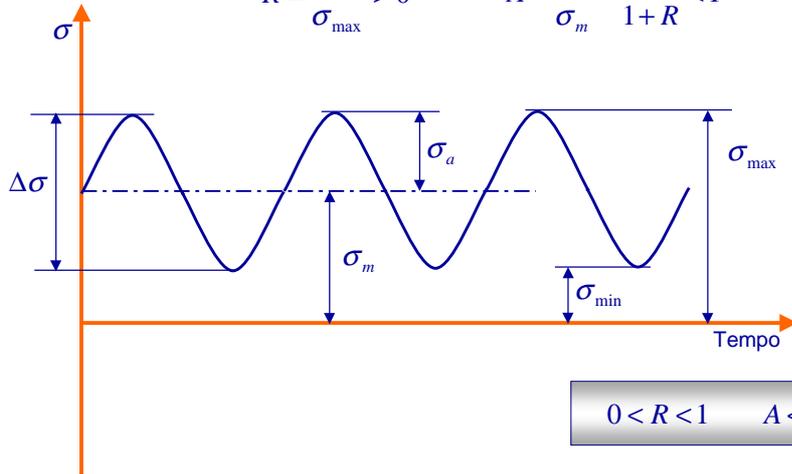
$R = 0 \quad A = 1$

Calcolo a fatica: nomenclatura

Se  $F_{min} > 0$  si ha:  $\sigma_{min} > 0$   $\sigma_m > \sigma_a$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} > 0$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} < 1$$



$0 < R < 1$      $A < 1$

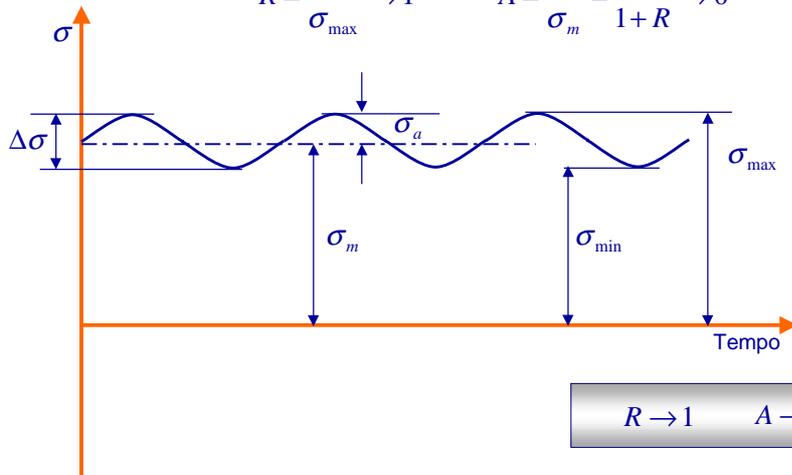
Calcolo a fatica: nomenclatura

Riducendo la parte ciclica del carico rispetto al valore medio ci si approssima alla sollecitazione statica :

$$\sigma_m \gg \sigma_a$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \rightarrow 1$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \rightarrow 0$$



$R \rightarrow 1$      $A \rightarrow 0$

## La curva di Wöhler

Come si ottengono i dati del materiale necessari per eseguire il dimensionamento a fatica?

Si eseguono prove di rottura a fatica in base alle quali si traccia la curva di Wöhler.

## La curva di Wöhler

Per ottenere sperimentalmente la curva di Wöhler è necessario eseguire una serie di prove di fatica su provini normalizzati.

I provini vengono sollecitati con un carico ciclico, generalmente alterno simmetrico ( $R = -1$ ) e portati a rottura.

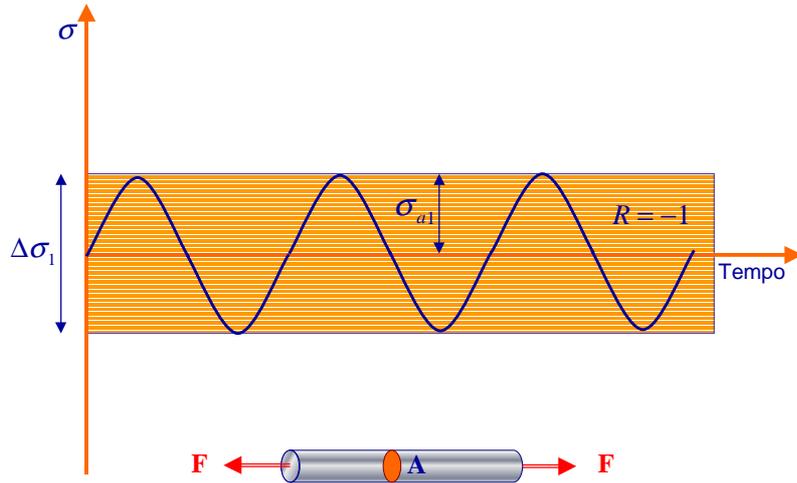


Per ogni provino sottoposto a test si misura il carico ciclico imposto e si registra il numero di cicli trascorsi al momento della rottura.

La curva di Wöhler

Per ogni livello di carico la prova viene ripetuta su un certo numero di provini, sufficiente a dare carattere statistico ai dati ottenuti (generalmente tra 10 e 20).

Livello di carico 1:  $\Delta\sigma_1 \rightarrow$  N° di cicli a rottura  $N_1$

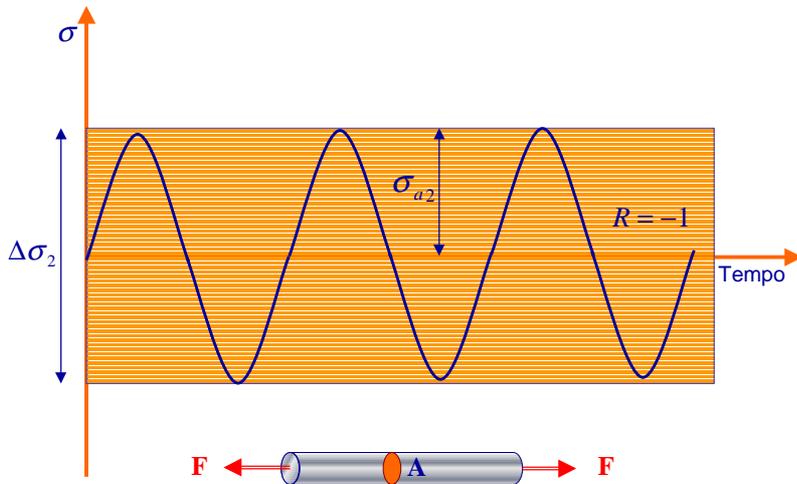


La curva di Wöhler

Per ogni livello di carico la prova viene ripetuta su un certo numero di provini, sufficiente a dare carattere statistico ai dati ottenuti (generalmente tra 10 e 20).

Livello di carico 1:  $\Delta\sigma_1 \rightarrow$  N° di cicli a rottura  $N_1$

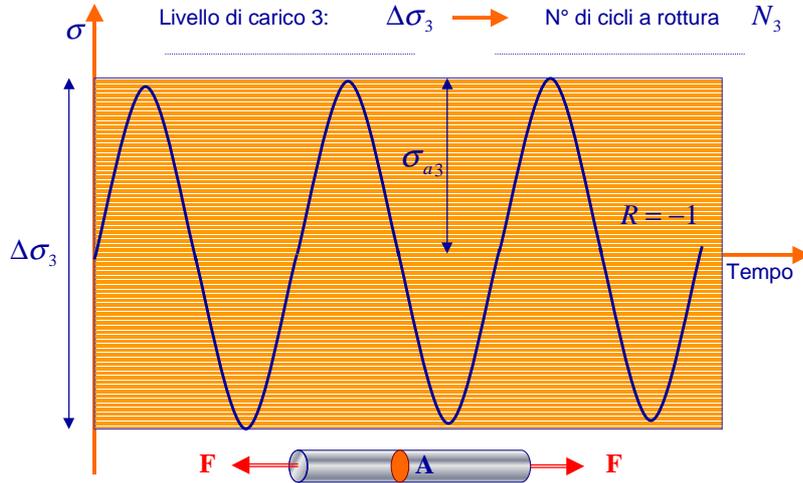
Livello di carico 2:  $\Delta\sigma_2 \rightarrow$  N° di cicli a rottura  $N_2$



La curva di Wöhler

Per ogni livello di carico la prova viene ripetuta su un certo numero di provini, sufficiente a dare carattere statistico ai dati ottenuti (generalmente tra 10 e 20).

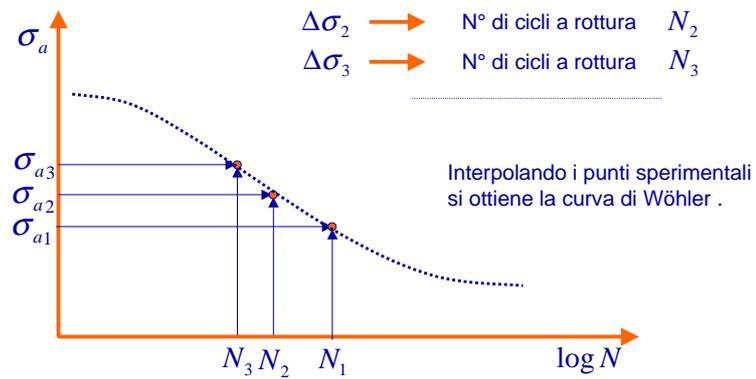
- Livello di carico 1:  $\Delta\sigma_1$  → N° di cicli a rottura  $N_1$
- Livello di carico 2:  $\Delta\sigma_2$  → N° di cicli a rottura  $N_2$
- Livello di carico 3:  $\Delta\sigma_3$  → N° di cicli a rottura  $N_3$

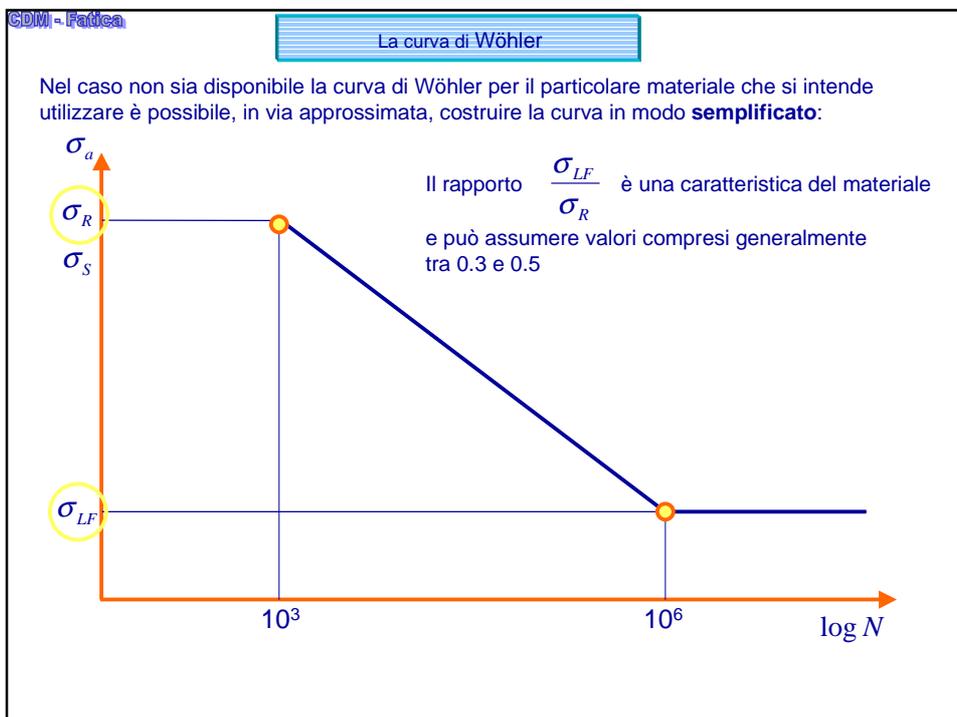
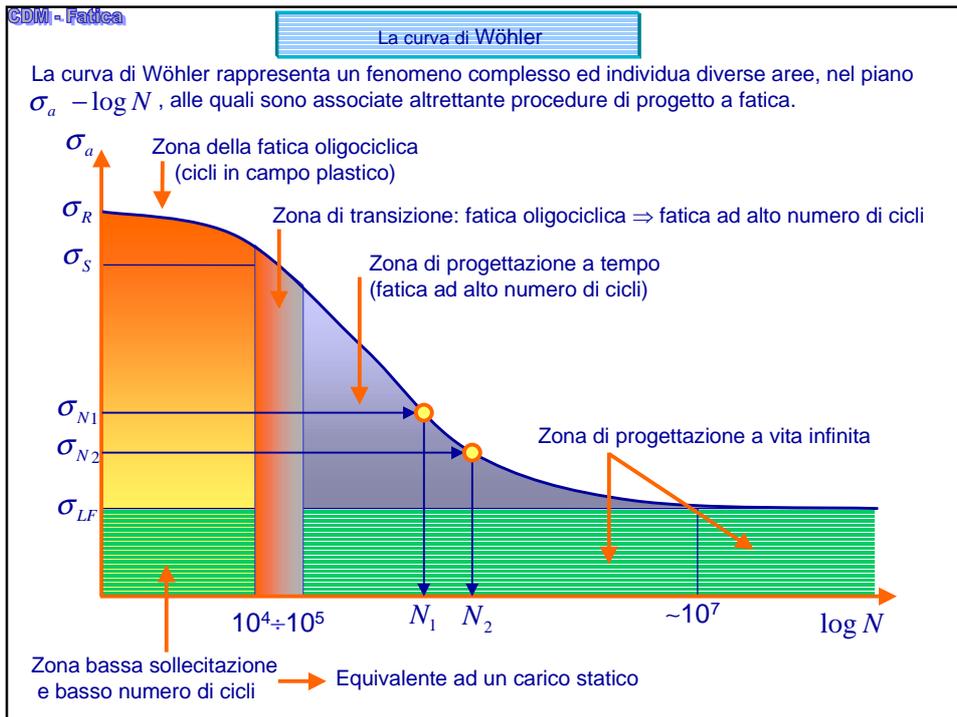


La curva di Wöhler

I risultati delle prove vengono riportati in un piano semilogartmico  $\sigma - \log N$

- $\Delta\sigma_1$  → N° di cicli a rottura  $N_1$
- $\Delta\sigma_2$  → N° di cicli a rottura  $N_2$
- $\Delta\sigma_3$  → N° di cicli a rottura  $N_3$

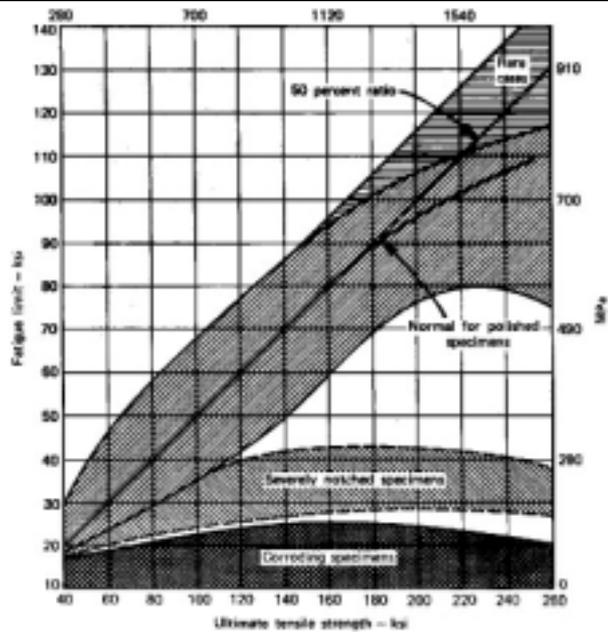




La curva di Wöhler

Dal diagramma sperimentale, qui riportato, è possibile ricavare il rapporto:

$$\frac{\sigma_{LF}}{\sigma_R}$$



General relationship between fatigue limits and tensile strength for polished unnotched and for corroding steel specimens [15] (reprinted with permission of John Wiley and Sons, Inc.).

Materiale	$\sigma_R$ (MPa)	$\sigma_{LF}$ (MPa)	$\sigma_{LF}/\sigma_R$	Note
C10	500	170	0.34	—
C16	700	270	0.38	—
C20	450	230	0.51	Normalizzato
C30	650	250	0.38	Bonificato
C40	710	280	0.39	Bonificato
C50	770	260	0.34	Bonificato
C60	850	320	0.38	Bonificato
40NiCrMo7	1000	550	0.55	Bonificato
X 12CrNi 188	550	200	0.36	Temprato
Fe 370	370	180	0.49	—
Fe 420	420	210	0.50	—
T1 A	830	480	0.58	Provino parallelo alla direzione di laminazione
T1 A	830	390	0.47	Provino perpendicolare alla direzione di laminazione
G15	150	70	0.47	—
G25	250	120	0.48	—
GS42	420	200	0.48	—
Ottone (90/10)	520	160	0.31	Trafilato – 10 <sup>8</sup> cicli
Ottone (70/30)	910	155	0.17	Per molle – 10 <sup>8</sup> cicli
Ottone navale	500	105	0.21	Lavorato a freddo H11.5 – 3x10 <sup>8</sup> cicli
Ottone Amm.	400	125	0.31	Lavorato a freddo H10 – 10 <sup>7</sup> cicli
Bronzo (95/5)	330	180	0.54	Ricotto – 10 <sup>8</sup> cicli
Bronzo Mn	500	120	0.24	Fuso – 10 <sup>8</sup> cicli
Bronzo Al	580	200	0.34	Ricotto – 8x10 <sup>7</sup> cicli
Monel	540	235	0.43	Ricotto – 10 <sup>8</sup> cicli
Cuproberillio	1400	380	0.27	Indurito per precipitazione – 10 <sup>8</sup> cicli
Avional	420	130	0.31	Bonificato
Ergal 55	550	170	0.31	Bonificato
Silumin	220	75	0.34	Fuso
Ti Al6 V4	1010	590	0.58	—

Limite di fatica

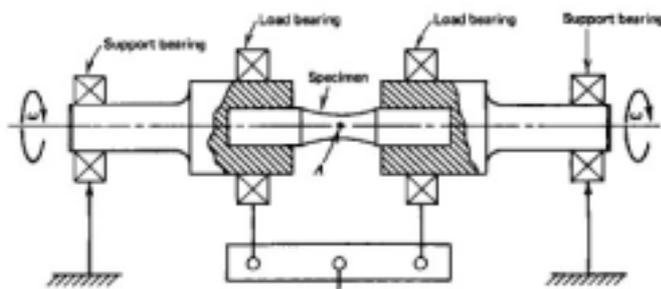
Valore del rapporto  $\frac{\sigma_{LF}}{\sigma_R}$  per alcuni materiali  
 Dati ottenuti con prove di flessione rotante

Le prove di fatica

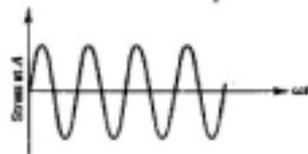
Come si eseguono le prove di fatica?

Le prove di fatica

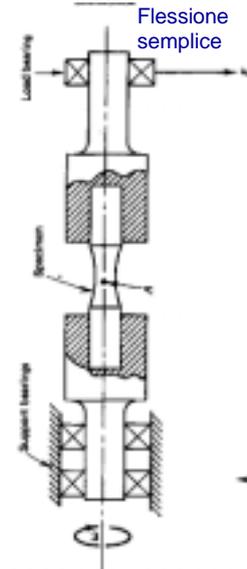
Flessione rotante



Flessione pura

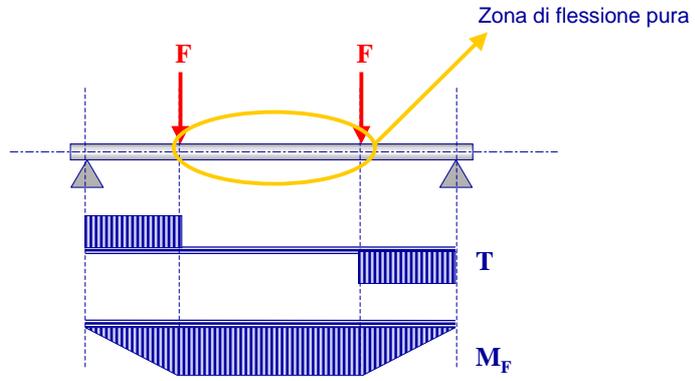


Flessione semplice



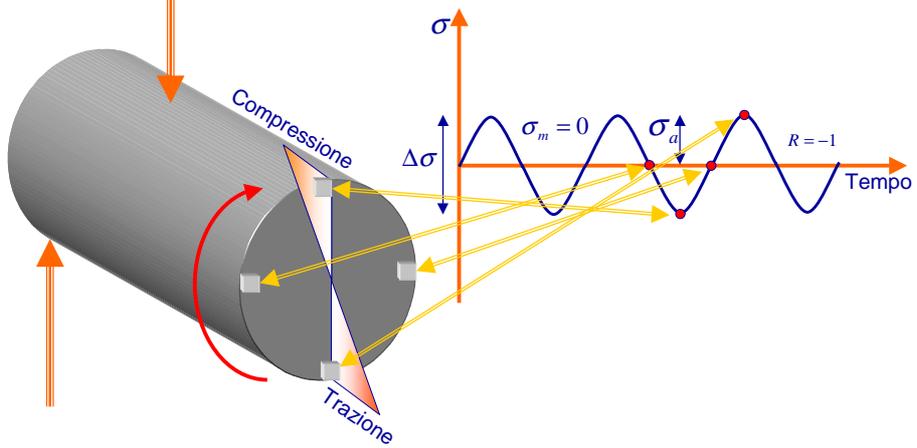
Le prove di fatica

Flessione rotante



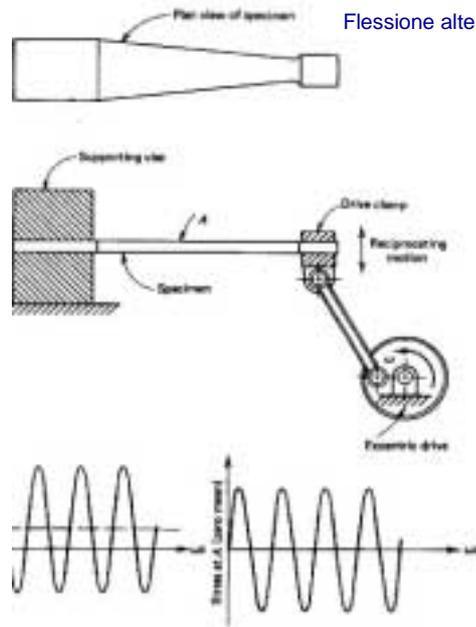
Le prove di fatica

Flessione rotante



Le prove di fatica

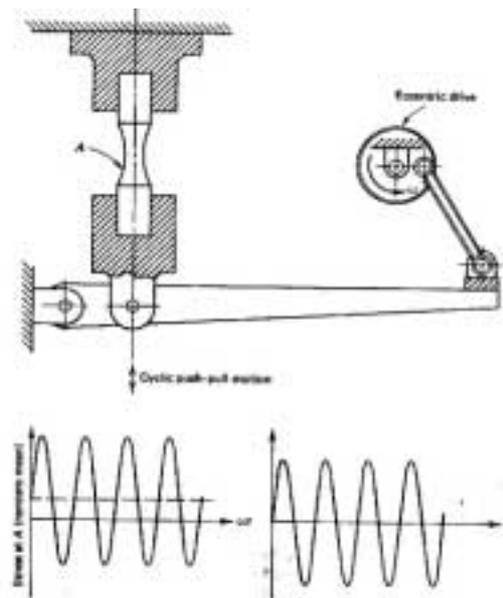
Flessione alterna



Le prove di fatica

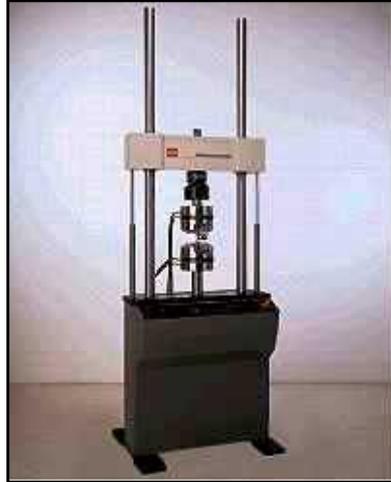
Trazione Compressione

Con attuatore meccanico



Le prove di fatica

Trazione Compressione



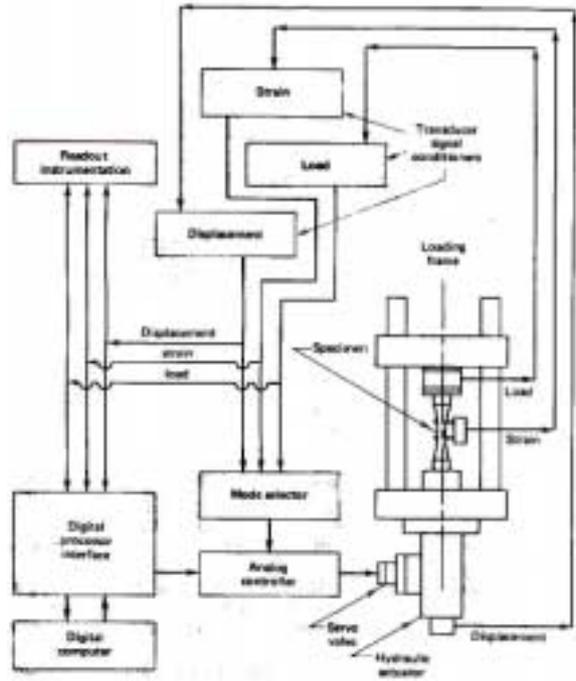
Con attuttore idraulico

Macchina di trazione-compressione da 20 t

Le prove di fatica

Trazione Compressione

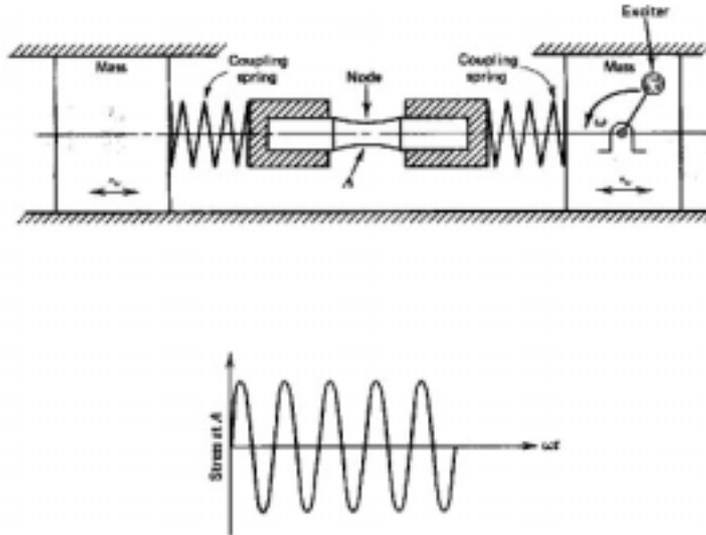
Schema di una macchina di trazione compressione per prove di fatica



Le prove di fatica

Trazione Compressione

Schema di una macchina di prova a risonanza

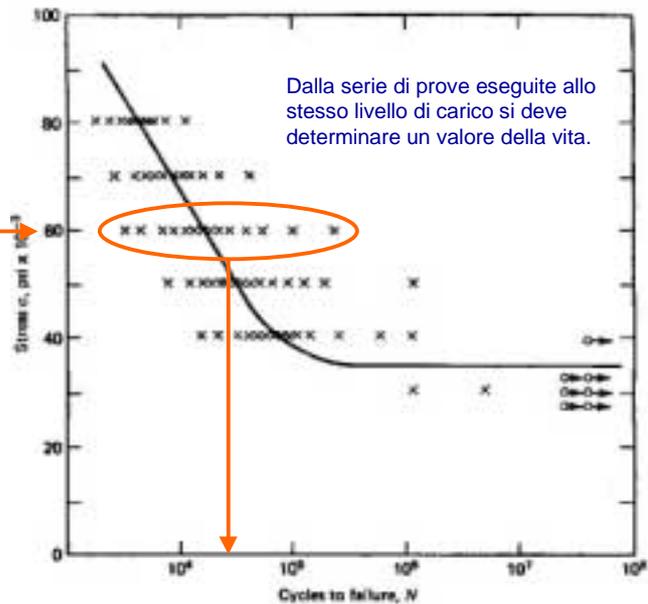


La curva di Wöhler

Dati di prove di fatica per il tracciamento della curva di Wöhler

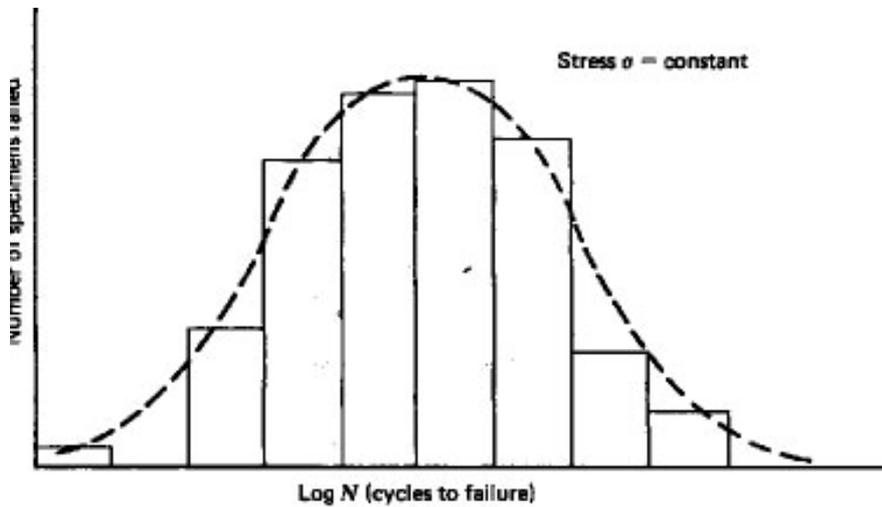
Dalla serie di prove eseguite allo stesso livello di carico si deve determinare un valore della vita.

$\sigma_N$



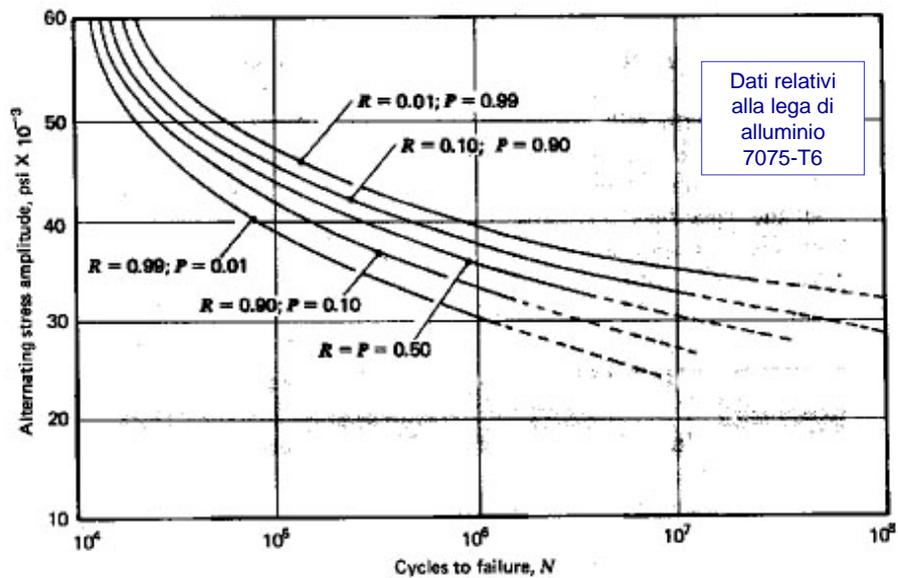
La curva di Wöhler

Distribuzione della densità di probabilità di rottura in funzione del numero di cicli per un fissato valore della sollecitazione.



La curva di Wöhler

Curve di Wöhler ottenute a diversi valori di probabilità



## Le prove di fatica

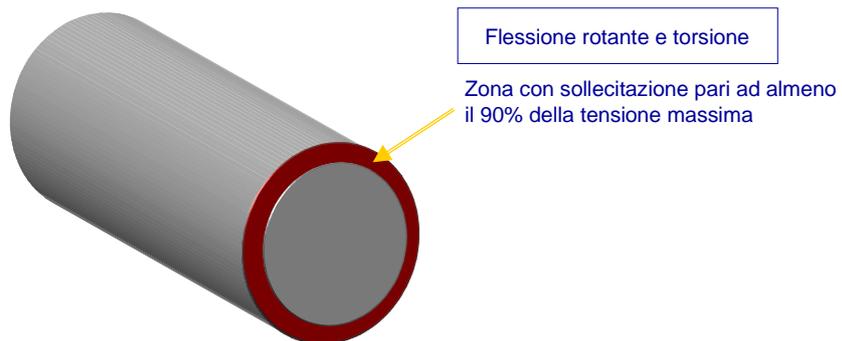
Il tipo di carico condiziona le prestazioni a fatica del materiale.

La tabella riporta il confronto, in termini percentuali, tra le tensioni limite di fatica ottenute con diversi modi di applicazione del carico, per uno stesso materiale.

Tipo di sollecitazione	Limite di fatica %
Flessione rotante	100%
Flessione piana	80%
Trazione-Compressione	70%
Torsione	55%

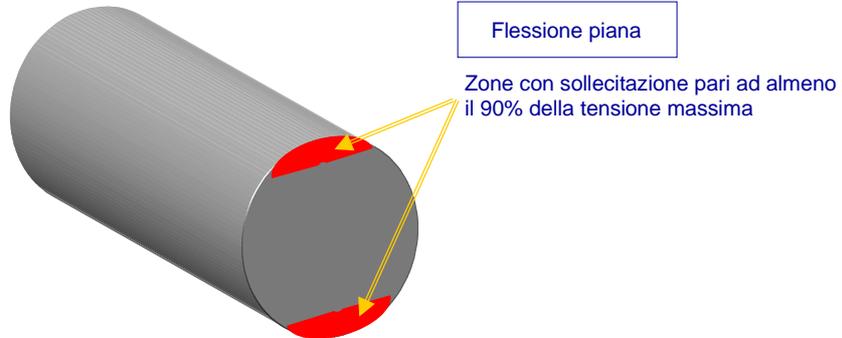
## Le prove di fatica

Il tipo di carico condiziona le prestazioni a fatica del materiale.



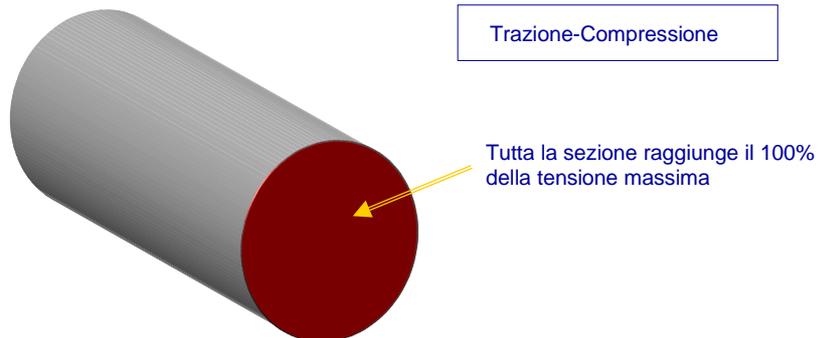
Le prove di fatica

Il tipo di carico condiziona le prestazioni a fatica del materiale.



Le prove di fatica

Il tipo di carico condiziona le prestazioni a fatica del materiale.



Le prove di fatica

In alcuni casi, quando è richiesta una elevatissima affidabilità strutturale, le prove di fatica vengono eseguite in piena scala, direttamente sui componenti o sulle strutture in progetto.



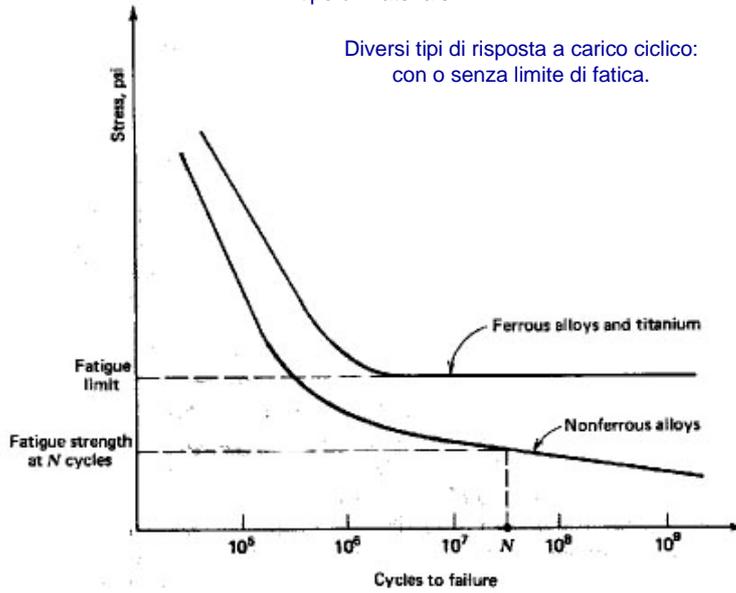
Fattori che influenzano la vita a fatica

Quali sono i fattori che influenzano la vita a fatica di una struttura?

Fattori che influenzano la vita a fatica

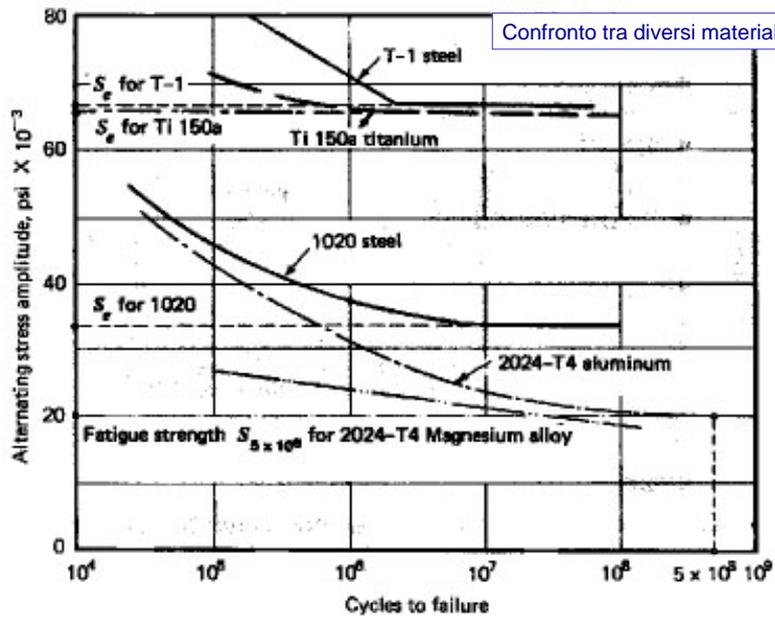
Il tipo di materiale.

Diversi tipi di risposta a carico ciclico: con o senza limite di fatica.

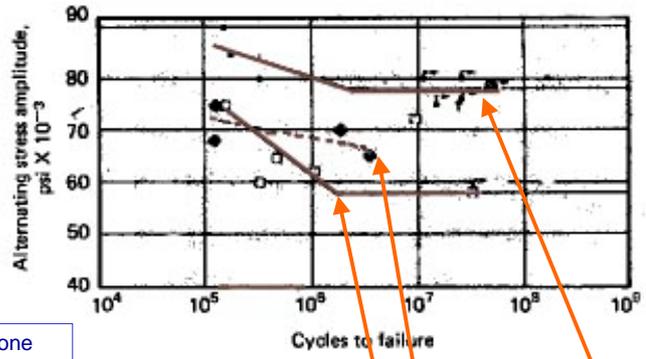


Fattori che influenzano la vita a fatica

Confronto tra diversi materiali



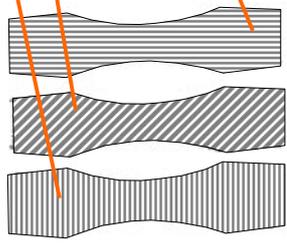
Fattori che influenzano la vita a fatica



Dipendenza dalla orientazione preferenziale dei grani.

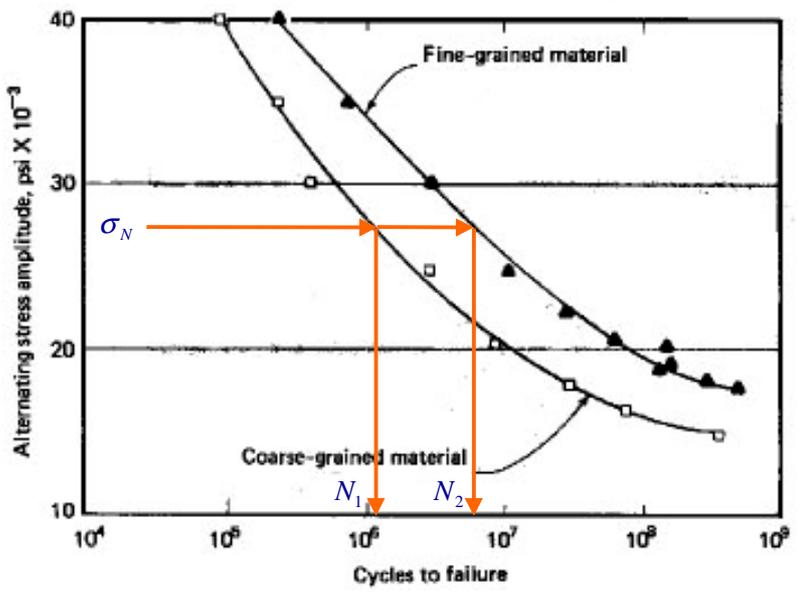
Ciò si verifica nei componenti ottenuti per forgiatura oppure nelle lamiere, per effetto della direzione di laminazione.

- Longitudinal
- ◆ Approx. 45°
- Transverse

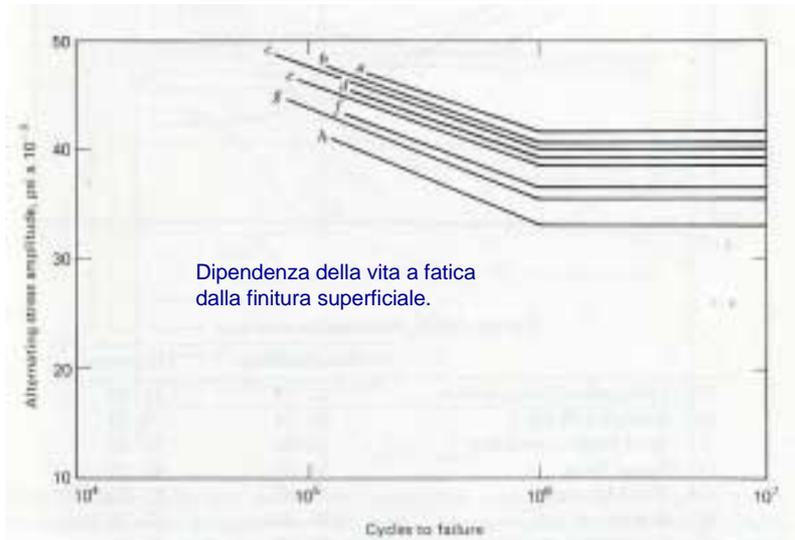


Fattori che influenzano la vita a fatica

Dipendenza della vita a fatica dalla dimensione dei grani cristallini.



Fattori che influenzano la vita a fatica

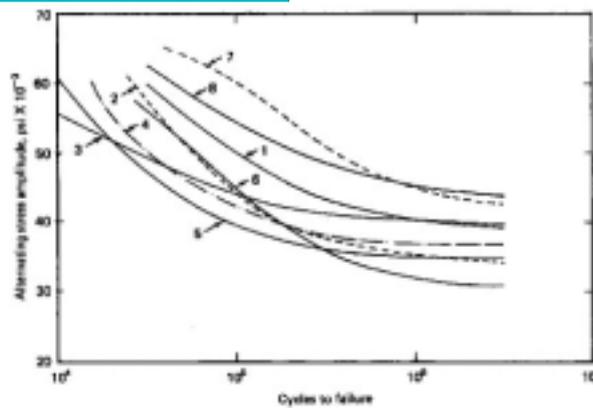


Dipendenza della vita a fatica dalla finitura superficiale.

Effect of surface finish on the S-N curve of 0.33 percent carbon steel specimens, tested in a rotating cantilever beam machine. (a) High polish, longitudinal direction. (b) FF emery finish. (c) No. 1 emery finish. (d) Coarse emery finish. (e) Smooth file. (f) As turned. (g) Bastard file. (h) Coarse file.

Fattori che influenzano la vita a fatica

Dipendenza della vita a fatica dalla finitura superficiale.



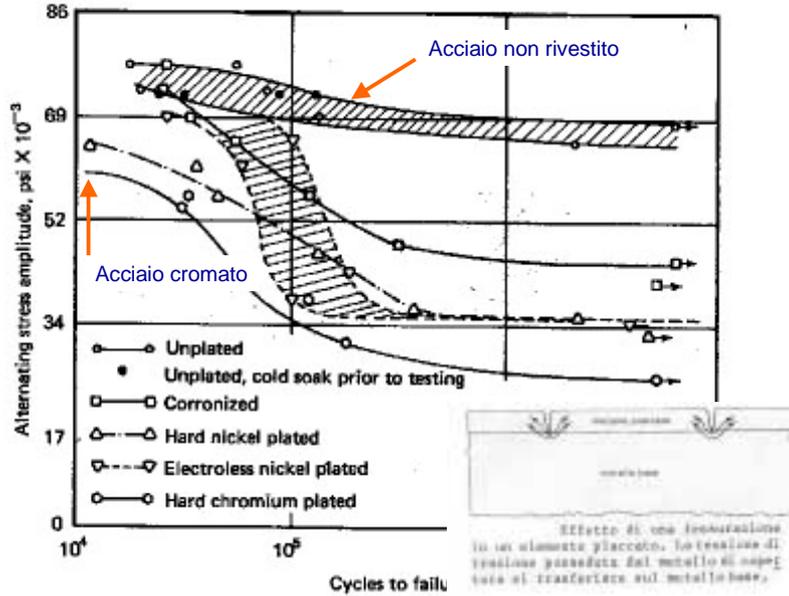
Surface finish, microinches rms

	Longitudinal	Transverse
(1) Longitudinal hand polish	11-14	15-19
(2) Smooth mill cut	21-26	9-13
(3) Sand blast—condition 1	55-60	55-56
(4) Vapor hone	54-59	48-55
(5) Hand burnish	35-45	85-100
(6) Rough mill cut	110-140	13-35
(7) Sand blast—condition 2	44-49	44-49
(8) Sand blast and hand polish	16-24	24-29

	Longitudinal	Transverse
(1) Longitudinal hand polish	11-14	15-19
(2) Smooth mill cut	21-26	9-13
(3) Sand blast—condition 1	55-60	55-56
(4) Vapor hone	54-59	48-55
(5) Hand burnish	35-45	85-100
(6) Rough mill cut	110-140	13-35
(7) Sand blast—condition 2	44-49	44-49
(8) Sand blast and hand polish	16-24	24-29

Fattori che influenzano la vita a fatica

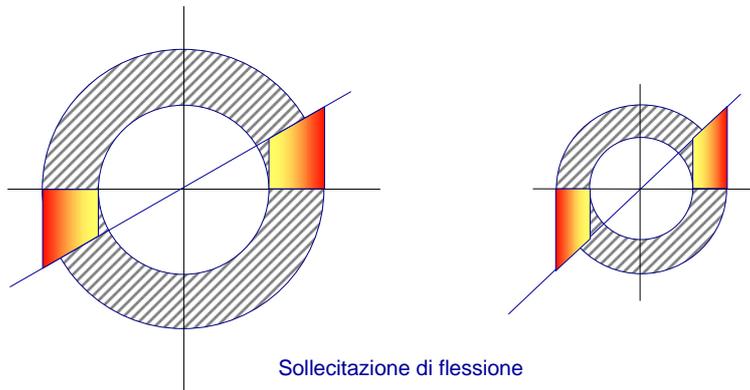
Effetto sulla durata a fatica di vari riporti metallici superficiali (placcatura).

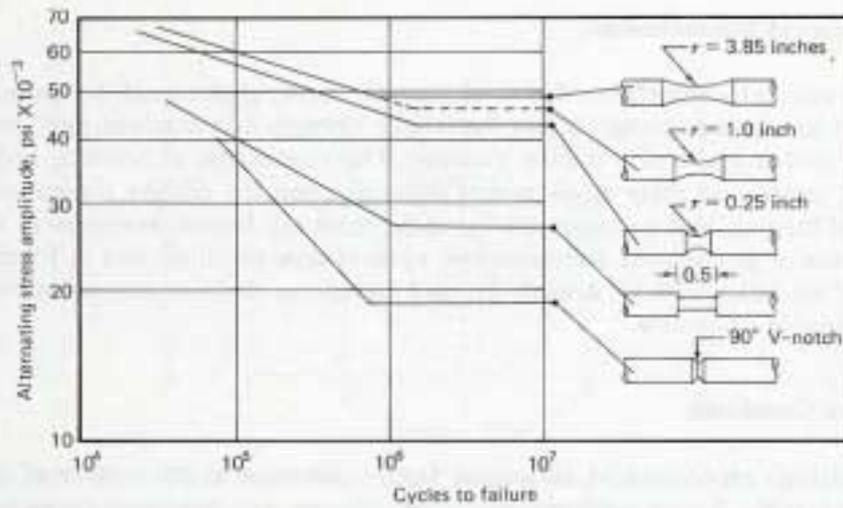


Fattori che influenzano la vita a fatica

Effetto della dimensione del componente sulla durata a fatica.

Nei componenti di maggiori dimensioni aumenta la probabilità che un difetto si trovi in una zona con tensione sufficientemente elevata da consentire la propagazione stabile (per fatica) oppure innescare la frattura

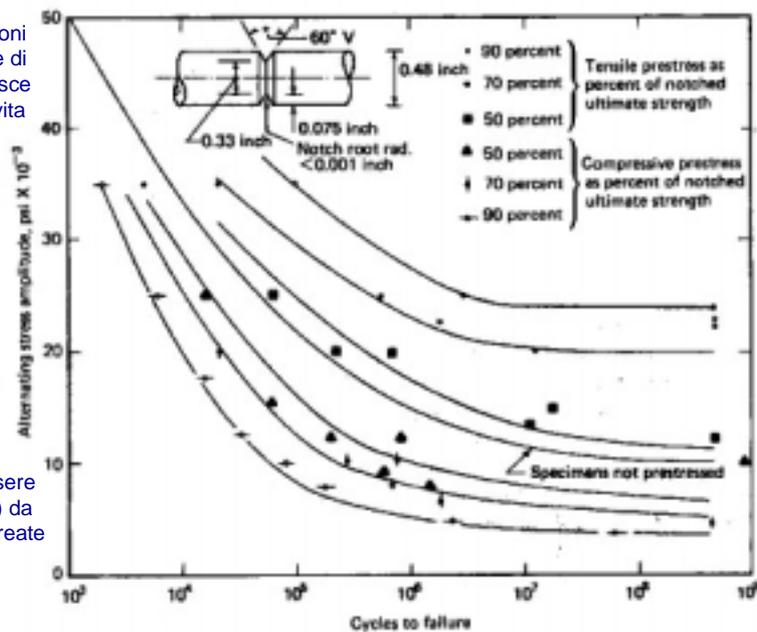




Effects of various geometrical discontinuities on the S-N curve of a 0.49 percent carbon steel, water quenched and tempered at 1200°F. Stock size was 0.40 inch, machined to nominal specimen size of 0.275 inch diameter.

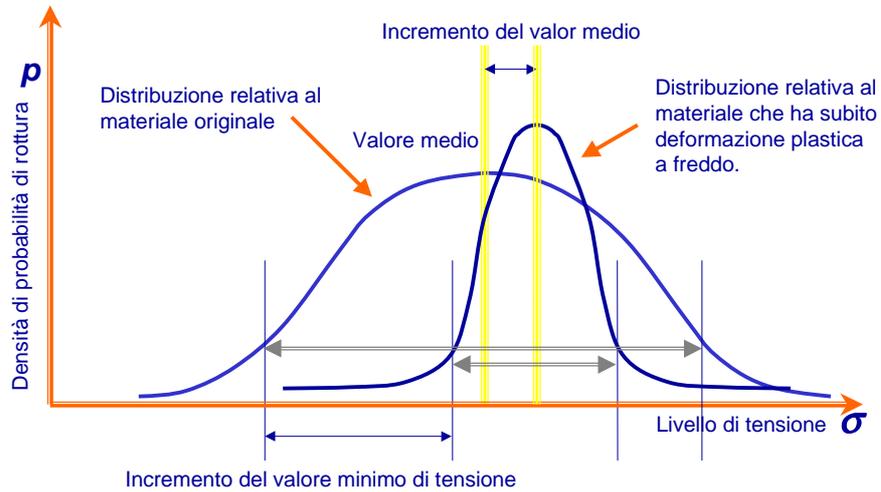
Effetto delle tensioni residue sul fattore di intaglio, che influisce fortemente sulla vita a fatica.

L'effetto dovuto all'intaglio può essere ridotto (o esaltato) da tensioni residue create con un opportuno precarico.



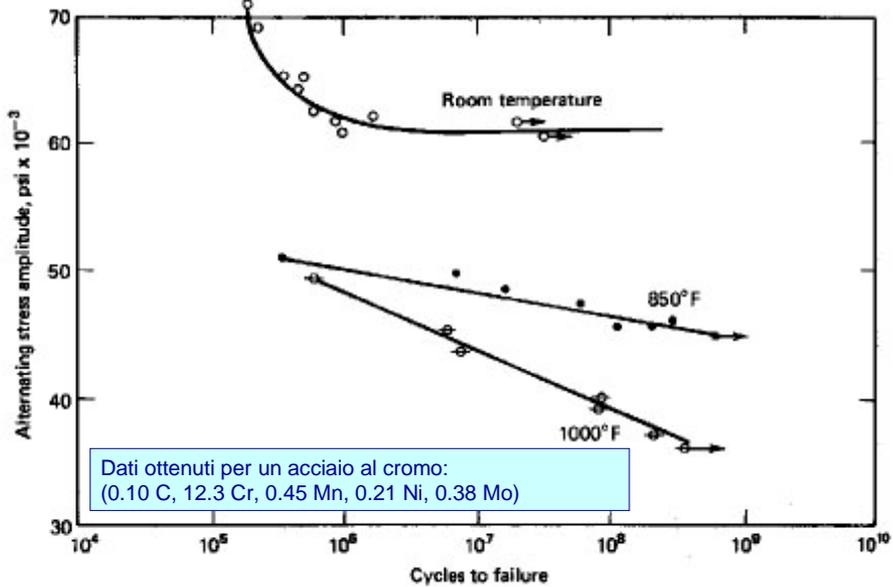
Fattori che influenzano la vita a fatica

La deformazione meccanica a freddo migliora il comportamento a fatica, sia con un incremento del valore medio del livello di sollecitazione sopportabile a parità di durata, sia con una riduzione della dispersione rispetto al valor medio.



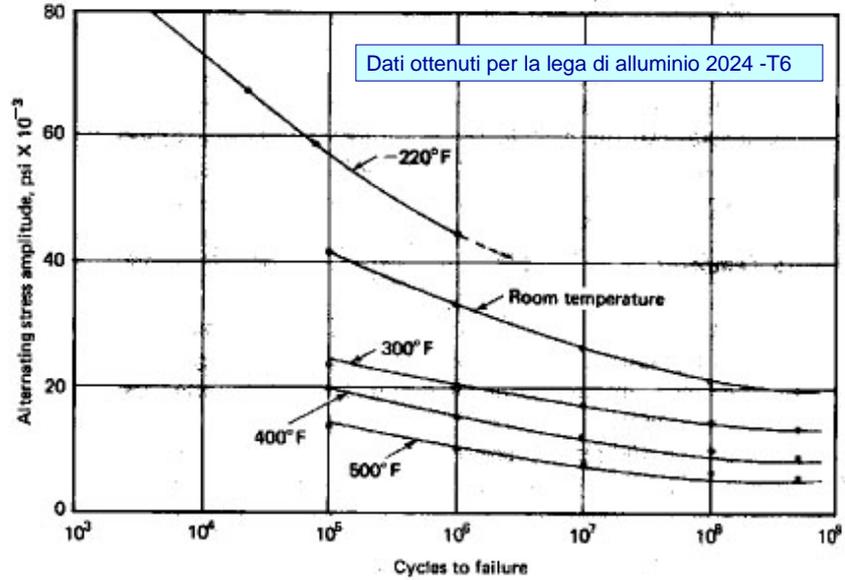
Fattori che influenzano la vita a fatica

Influenza della temperatura di lavoro sulla vita a fatica.



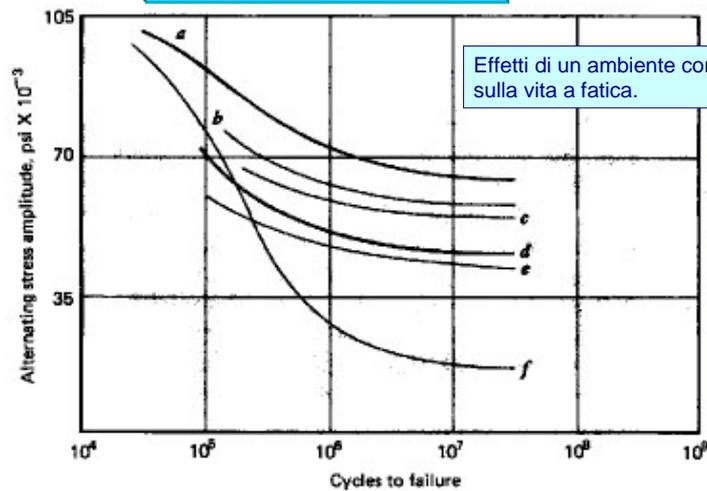
Fattori che influenzano la vita a fatica

Influenza della temperatura di lavoro sulla vita a fatica.



Fattori che influenzano la vita a fatica

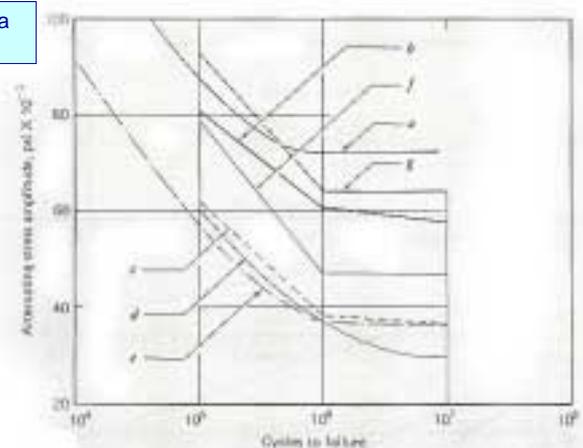
Effetti di un ambiente corrosivo sulla vita a fatica.



Effects of corrosion on the S-N curve of alloy steel tested in rotating bending. (a) Fatigue strength in air. (b) Precorroded for 1 day in tap water. (c) Precorroded for 2 days in tap water. (d) Precorroded for 6 days in tap water. (e) Precorroded for 10 days in tap water. (f) Bending fatigue test carried out in tap water. (Data from ref. 39; adapted with permission of Pergamon Press, Inc.)

Fattori che influenzano la vita a fatica

Effetti della saldatura sulla vita a fatica.

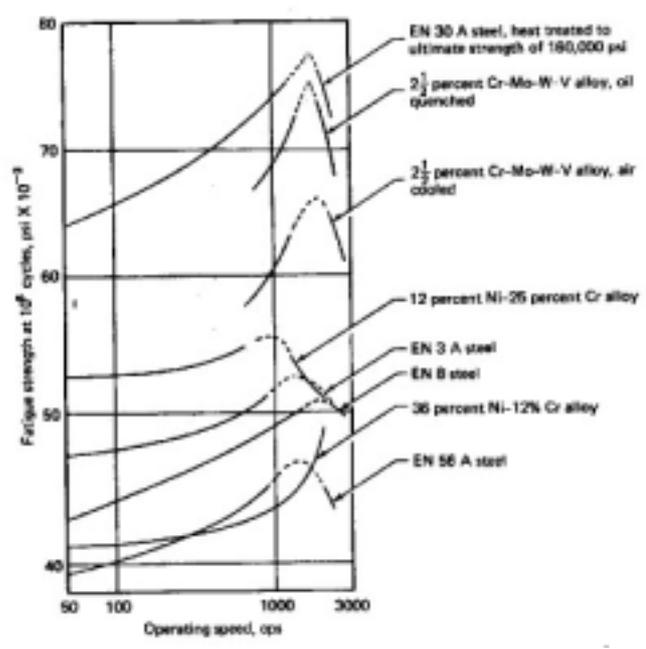


Effects of flash welded butt joints, with various heat treatments, on the S-N curve of SAE 4130 steel. Tests were completely reversed reciprocating bending. All specimens were  $\frac{1}{2}$  inch plate ground to  $\frac{1}{8}$  inch after welding. (a) Heat treated, unwelded ( $\sigma_u = 192,000$  psi). (b) Normalized, unwelded ( $\sigma_u = 121,000$  psi). (c) Normalized, welded ( $\sigma_u = 124,000$  psi). (d) Normalized, welded, normalized ( $\sigma_u = 113,000$  psi). (e) Normalized, welded, heat treated ( $\sigma_u = 172,000$  psi). (f) Normalized, welded, heat treated, reinforced 10 percent one side. (g) Normalized, welded, heat treated, reinforced 10 percent both sides.

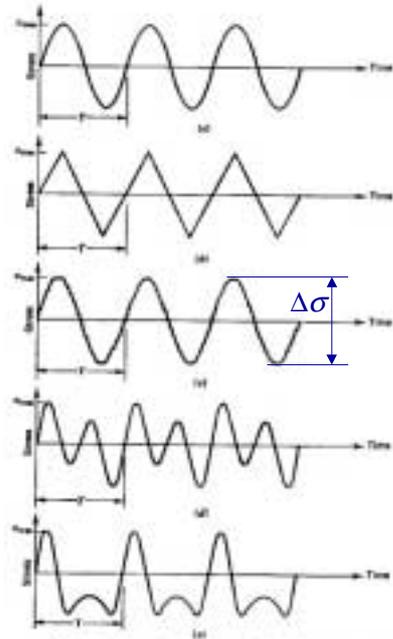
Fattori che influenzano la vita a fatica

Effetto della frequenza di variazione del carico sulla vita a fatica.

L'aumento di frequenza ha l'effetto di migliorare la durata fino a che non prevale l'effetto opposto, dovuto all'incremento di temperatura provocato dall'isteresi elastica.



Fattori che influenzano la vita a fatica



A variety of stress-time patterns used in evaluating fatigue behavior:  
 (a) Completely reversed sinusoid. (b) Completely reversed ramp. (c) Superposed ripple. (d) Secondary peaks. (e) Distorted peaks.

La forma della funzione carico-tempo non sembra avere alcuna influenza sulla vita a fatica.

Ciò che crea danneggiamento è l'ampiezza dell'inversione di carico

Fattori che influenzano la vita a fatica

Riepilogo dei principali fattori che influenzano la durata a fatica degli organi meccanici

- Composizione del materiale
- Dimensione del grano
- Orientazione preferenziale dei grani
- Trattamenti termici
- Trattamenti superficiali
- Finitura superficiale
- Saldature

- Dimensioni
- Geometria - effetti d'intaglio
- Frequenza
- Temperatura
- Tensioni residue
- Rivestimenti metallici
- Ambiente corrosivo

