



# FATICA



Flessione rotante



CURVA DI WOHLER

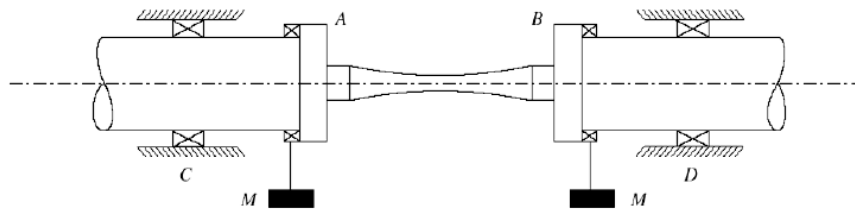
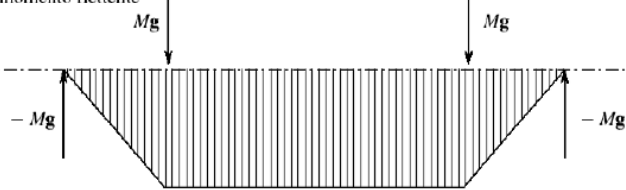
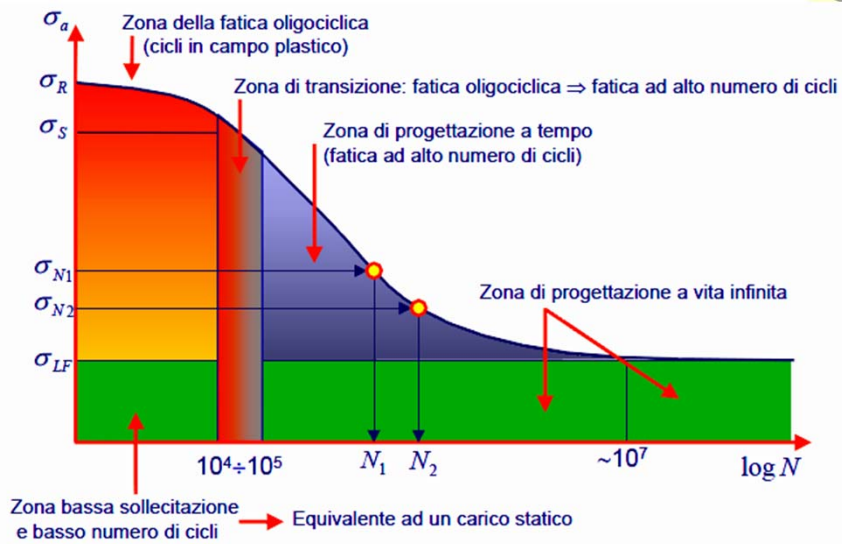


Diagramma del momento flettente



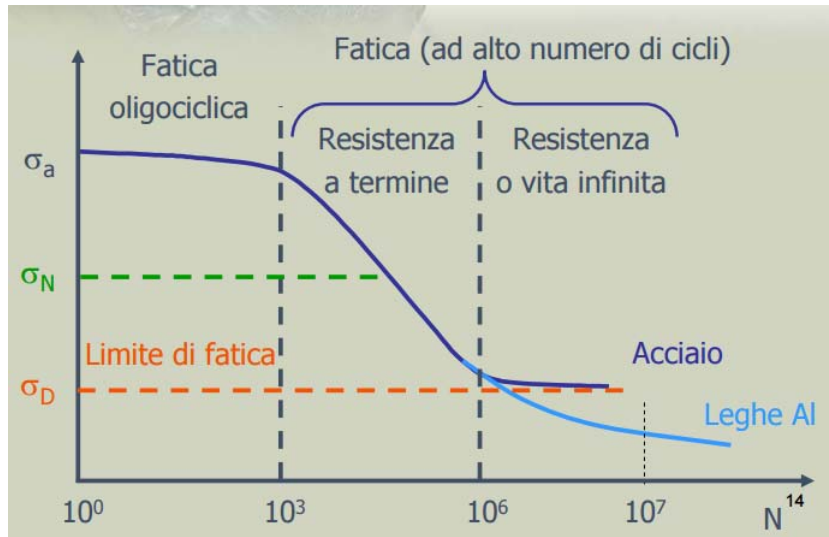
# FATICA: curva di Wohler



2



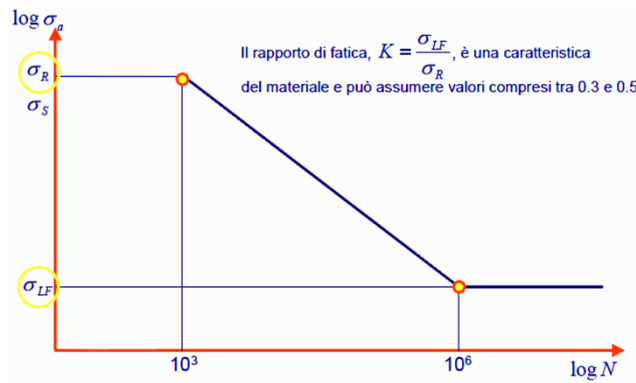
### FATICA: curva di Wohler



3



### FATICA: curva di Wohler



$$\sigma_f N_f^{1/m} = K^{1/m}$$

$$\sigma_f = a N_f^b$$

$$N_f = \left( \frac{\sigma_f}{a} \right)^{1/b}$$

4



## FATICA: curva di Wohler



la curva viene ricavata da test su provini cilindrici ben definiti e ben lavorati

in condizioni di carico alterno-simmetrico:  $R = -1$

in condizioni operative di laboratorio



Designation: E 739 – 91 (Reapproved 2004)<sup>e1</sup>

Standard Practice for  
Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N)  
and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data<sup>1</sup>

Come tener conto delle condizioni operative reali?

5



## FATICA



Fattori che influenzano il comportamento a fatica:

### CONDIZIONI OPERATIVE

tipologia di carico

frequenze

temperature

ambiente

### GEOMETRIA:

variazioni geometriche

effetto scala

### MATERIALE

tipologia e struttura del materiale

### MANIFATTURA:

finitura superficiale

trattamenti superficiali

trattamenti termici e/o

meccanici

**EFFETTO DEL CARICO MEDIO**

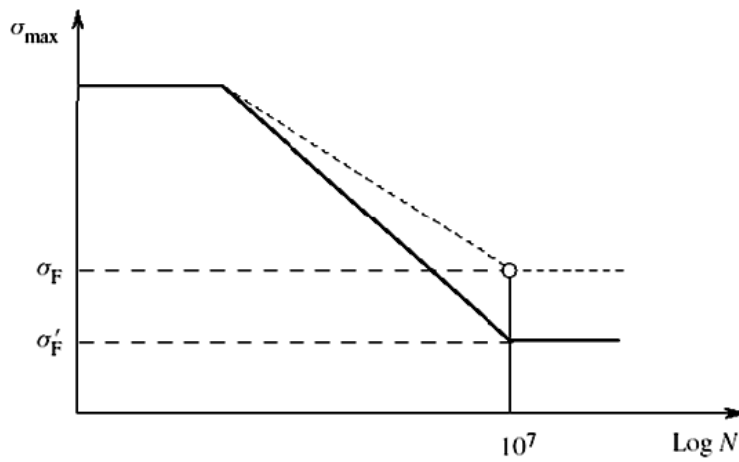
6



PER LA MAGGIOR PARTE DI QUESTI FATTORI SI UTILIZZANO DEI COEFFICIENTI CORRETTIVI

$$K_\alpha = \frac{\sigma_{LF}^\alpha \text{ (carico limite di fatica del componente)}}{\sigma_{LF}^\alpha \text{ (carico limite da prova di fatica standard)}}$$

K indica in *fattore correttivo ed è in genere minore di 1*





## Effetto della tipologia di carico



Da dati sperimentali sugli acciai si è visto che:

1. nel caso di flessione piana i limiti di fatica sono di qualche punto percentuale inferiori rispetto a quelli a flessione rotante
2. per i carichi di trazione compressione i limiti sono simili per provini di grandi dimensioni, per provini di circa 10 mm i limiti di fatica sono circa il 70% di quelli a flessione rotante
3. per carichi di torsione si deve usare un K pari a 0.8 per le ghise e 0.6 (circa) per gli acciai.

Caso trattato a parte per carichi non alterno simmetrici: effetto del carico medio

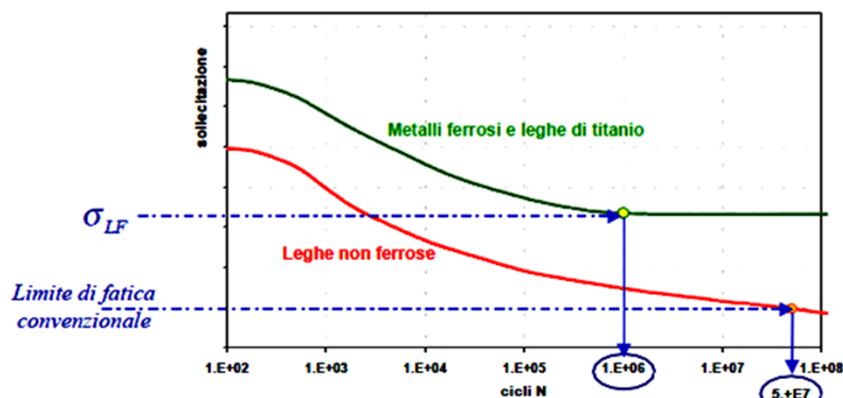
9



## Effetto della tipologia di materiale



Non tutti i materiali presentano limite di fatica.



10



## Effetto della tipologia di materiale



La variabilità della composizione comporta variabilità nella risposta a fatica.

Ad esempio gli acciai a seconda della loro struttura, bainitica, ferritica, perlitica e martensitica hanno un comportamento a fatica differente,  $K$  va rispettivamente diminuendo, (il comportamento a fatica peggiora).

11



## Effetto della tipologia di materiale



L'influenza delle dimensioni del grano cristallino sulla resistenza a fatica è piuttosto modesta e variabile. Spesso è mascherata dall'influenza della microstruttura, ma si può affermare comunque che, nei metalli non ferrosi e negli acciai ricotti, l'affinamento del grano aumenta il carico di rottura e quindi il limite di fatica.

Sugli acciai bonificati invece l'influenza delle dimensioni del grano è minore se non addirittura trascurabile.

12



## Effetto della tipologia di materiale



A parità di limite di rottura, una struttura aciculare resiste meno alla fatica di una globulare, poiché una forma tondeggiante delle particelle riduce la concentrazione di tensione.

Le strutture lamellari, come quella perlitica degli acciai eutettoidici, presentano una tensione di rottura (e quindi un limite di fatica) crescente al decrescere della spaziatura media tra le lamelle.

13



## Effetto della tipologia di materiale



Tenore di C[%]	$\sigma_R$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$\sigma_a/\sigma_R$
0,16	600	280	0,465
0,16	900	320	0,355
0,39	1000	320	0,32
0,39	1500	410	0,27
0,58	1000	320	0,32
0,58	1600	440	0,275
0,90	1550	470	0,30
0,90	1930	620	0,32

Tabella. Influenza dell'incrudimento sul limite di fatica a flessione rotante di fili di acciaio al carbonio ( da GODFREY)

14



## Effetto della frequenza di oscillazione



Fino a 150 Hz l'effetto è trascurabile.

A frequenze maggiori si ha un iniziale apparente miglioramento delle prestazioni dovuto al ritardo con cui la tensione nel materiale segue la sollecitazione applicata.

A frequenze ancora maggiori (>1000Hz) prevale l'effetto dovuto all'incremento di temperatura provocato dall'isteresi elastica che tende a ridurre la vita del materiale.

15



## Effetto della temperatura e delle tensioni residue



Temperature di esercizio:

con  $T_{op} < T_{amb}$  possibile frattura fragile

con  $T_{op} > T_{amb}$  possibile snervamento

in genere parametro correttivo come per prova di trazione

Tensioni residue:

possono migliorare o peggiorare il comportamento a fatica del componente;

tensioni residue di compressione, esempio pallinatura (su molle elicoidali) aumentano di circa il 20% la resistenza a fatica del componente

16





### Effetto della temperatura e delle tensioni residue

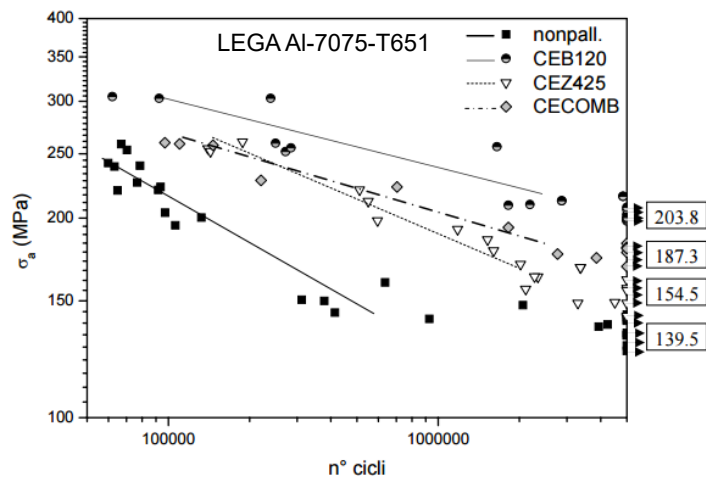


PROCESSO		TENSIONI RESIDUE	
TRATTAMENTI TERMICI	Trattamenti termici massivi	+ / -	
	Trattamenti termici selettivi (tempra superficiale)	-	
	Trattamenti termochimici di diffusione	-	
TRATTAMENTI SUPERFICIALI	Cromatura	+	
	Nichelatura	+	
	Tornitura	+	
LAVORAZIONI MECCANICHE	Fresatura	Frontale	-
		Periferica concorde	+
		Periferica discorde	-
	Rettifica	+ / -	
	Trafilatura	+ / -	
	Elettroerosione	+	

17



### Esempio pallinatura



M. Benedettia , C. L. Azanza Ricardo , C. Santusb , V. Fontanaria

18



## Effetto scala



Con *effetto scala* si intende, per pezzi di *egual forma*, la *diminuzione della resistenza a fatica* che si verifica al *crescere delle dimensioni*.

Il fenomeno si nota per stati di sollecitazione quali *flessione o torsione* in cui compaia un *gradiente delle sollecitazioni* dalla *superficie al cuore*.

**ESEMPIO: ALBERI DI TRASMISSIONE**

per questo caso esiste norma UNI

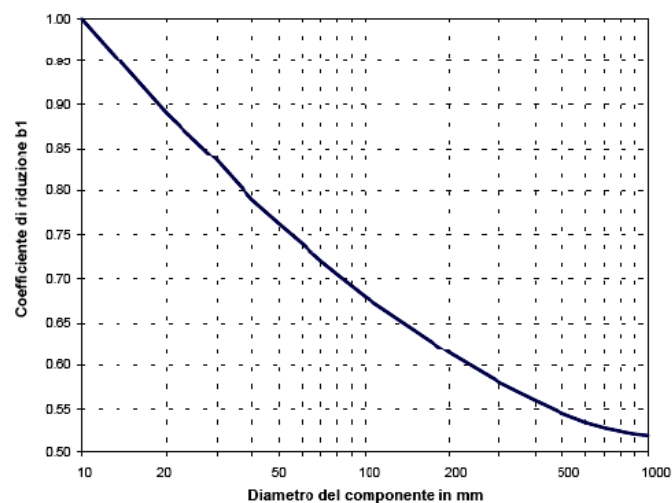
19



## Effetto scala



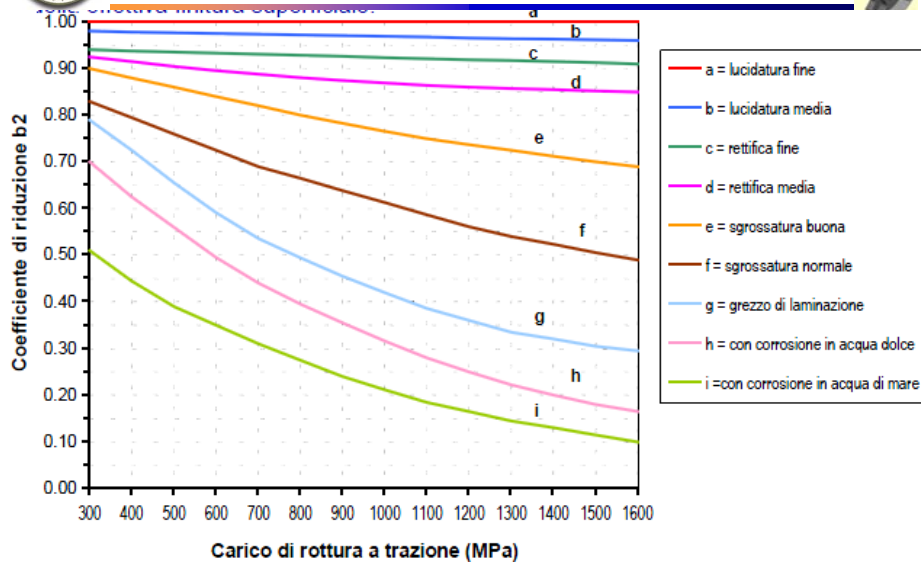
barrotti cilindrici



20



### Finitura superficiale



21



### Finitura superficiale



(Shigley et. al.)

$$K_a = aS_{ut}^b$$

Finitura superficiale	Fattore $a$ $S_{ut}$ MPa	Esponente $b$
Rettifica	1.58	-0.085
Lavorazione alle macchine utensili o trafilatura a freddo	4.51	-0.265
Laminazione a caldo	57.7	-0.718
Pezzo fucinato e sbavato	272.	-0.995

Da C.J. Noll e C. Lipson, *Allowable Working Stresses*, Society for Experimental Stress Analysis, vol. 3, n. 2, 1946 p. 29.  
 Riprodotto da O.J. Horgan (a cura di) *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, New York. Copyright © 1953 by The McGraw-Hill Companies, Inc. Ristampato per concessione.

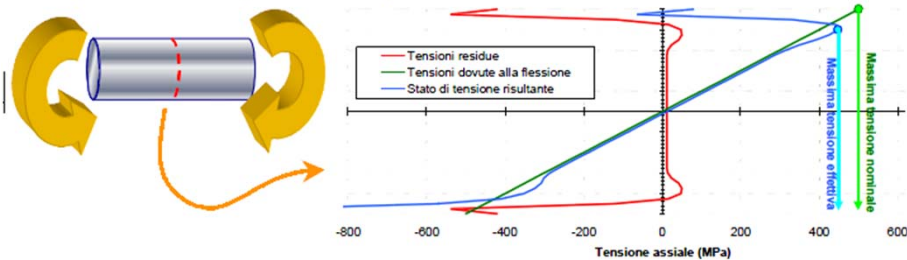
22



## Trattamenti superficiali



L'effetto dei trattamenti superficiali sul comportamento a fatica dipende dallo stato di tensione residuo che questi trattamenti sono in grado di generare. Infatti, delle tensioni residue di compressione sulla superficie del componente inibiscono la formazione di cricche di fatica.



*dipende ovviamente dal tipo di trattamento*

23



## Trattamenti superficiali



I rivestimenti superficiali "metallici" in generale riducono la resistenza a fatica; esempi: cromatura, nichelatura  
il K correttivo varia da 0,9 fino a circa 0,4 a seconda del tipo di acciaio

trattamenti come la nitrurazione generano tensioni superficiali di compressione che, in particolare per i componenti sottoposti a flessione e/o torsione migliorano (anche se di poco) il comportamento a fatica dello stesso

Effetti altamente positivi per trattamenti quali cementazione o tempra per induzione: K risulta essere superiore a 1,368 anche 2 per certi acciai)

24



## Trattamenti superficiali



stesso discorso anche per i trattamenti "meccanici"

*esempio: pallinatura*  
miglioramento di circa il 20% ( o più ) a seconda dell'acciaio e del componente

*analogamente per la rullatura*

tutto dipende dalle modalità con cui avviene il trattamento meccanico

25



## Effetto intaglio



$$K_t = \frac{\sigma_{vero}}{\sigma_{nominale}}$$

$$K_f = \frac{\sigma_{aL-materiale}}{\sigma_{aL-intaglio}}$$

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

con q = sensibilità all'intaglio del materiale

formule empiriche:

La formula empirica di Peterson fornisce q e  $K_f$  in funzione del raggio dell'intaglio r e del termine a avente le dimensioni di una lunghezza e dipendente dal materiale:

$$q = \frac{1}{1 + a/r}$$

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + a/r}$$

26



## Effetto intaglio



MATERIALE	$a$ (mm)
Leghe di alluminio	0.508
Acciaio bonificato o normalizzato a basso tenore di carbonio	0.254
Acciaio temprato	0.0635
Acciai ad alta resistenza ( $\sigma_T > 550\text{MPa}$ )	$0.025 (2070\text{MPa}/\sigma_T)^{1.8}$

La formula empirica di *Neuber* fornisce  $q$  e  $K_f$  in funzione del raggio dell'intaglio  $r$  e della costante  $b$  del materiale, espressa in mm, interpretata dall'autore come dimensione (ideale) del grano:

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{b/r}} \quad K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{b/r}} \quad (15.27,28)$$

La costante  $b$  può essere ottenuta mediante questa ulteriore formula empirica valida per  $\sigma_T < 1520$  Mpa:

$$\log b = -(\sigma_T - 134\text{MPa})/586 \quad (15.29)$$

27



## Effetto intaglio



su Shigley per gli acciai a viene calcolata tramite polinomio approssimato del terzo ordine in funzione del carico di rottura a trazione:

Tipo di intaglio	$\sqrt{a}(\sqrt{\text{mm}})$	$\sigma_R$ (MPa)
foro trasversale	$174/\sigma_R$	
spallamento	$139/\sigma_R$	
gola	$104/\sigma_R$	

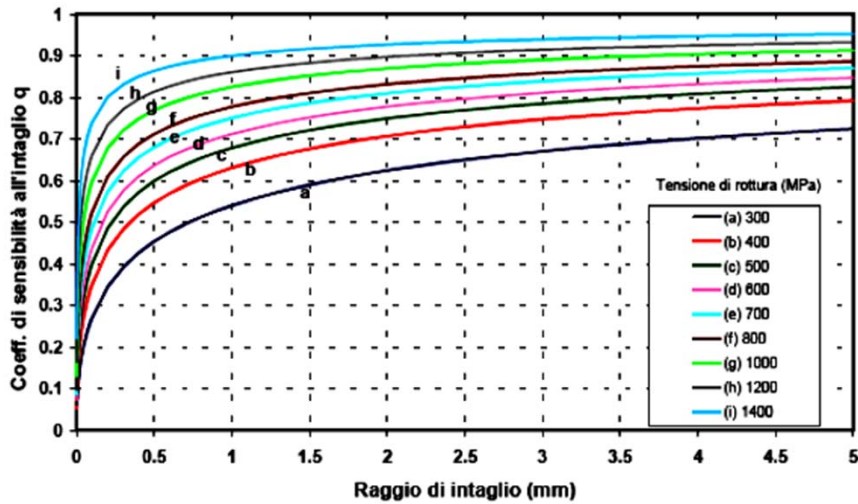
28



### Effetto intaglio: valori di $q$ per gli acciai



#### Sollecitazione di FLESSIONE o TRAZIONE



29

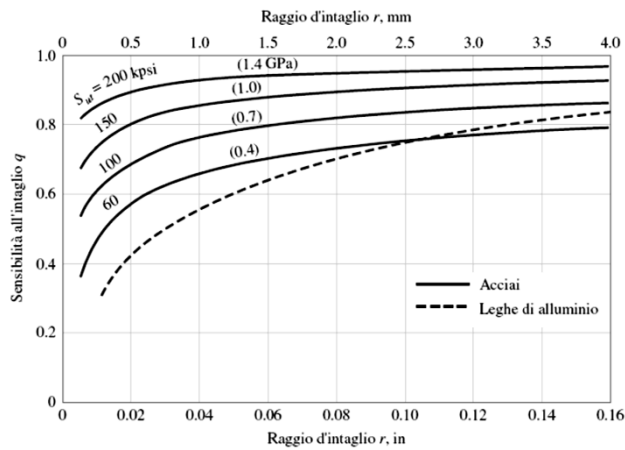


### Effetto intaglio: valori di $q$ per gli acciai



**Figura 6-20**

Sensibilità all'intaglio per acciai e per le leghe di alluminio fucinate UNS A92024-T soggette a flessione alternata o a carico assiale alternato. Per i più grandi raggi d'intaglio, usare il valore di  $q$  corrispondente a  $r = 4$  mm [0.16 in]. (Da Gorge Sines e J.L. Waisman (a cura di), *Metal fatigue*, McGraw-Hill, New York. © 1969 McGraw-Hill Companies, Inc. Riproduzione autorizzata).



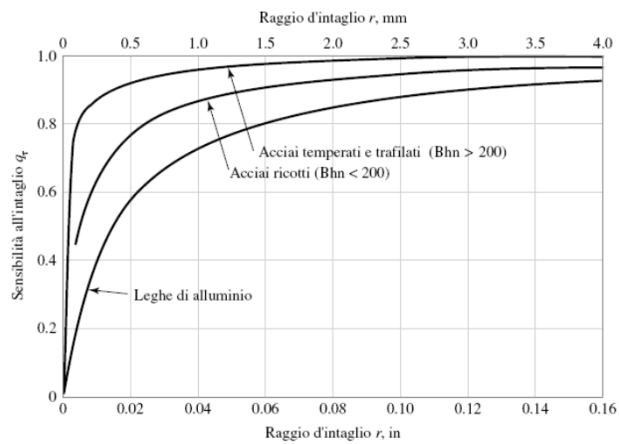


## Effetto intaglio: valori di $q$ per gli acciai



**Figura 6-21**

Sensibilità all'intaglio per materiale sottoposti a torsione alternata. Per i più grandi raggi d'intaglio, usare il valore  $q_r$  corrispondente a  $r = 4 \text{ mm}$  (0.16 in).

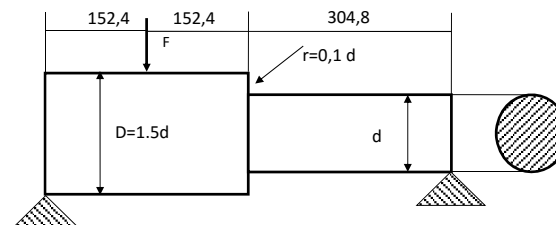


## Esempio



Dato l'albero in figura determinare:

1. Il diametro  $d$  per 75 minuti di vita, (materiale 1)
2. Il diametro  $d$  per vita infinita, (materiale 1)
3. Trovare il diametro per 75 minuti di vita se si usa il materiale 2 ed il risparmio in peso.







## Esempio



Usare un coefficiente di sicurezza pari a 1.6

$$F = 53400 \text{ N}$$

L'albero ruota a 1200 giri al minuto ed ha subito una lavorazione superficiale di "rettifica fine".

Materiale 1 (acciaio comune):

carico di rottura = 830 MPa; carico di snervamento = 620 Mpa

peso specifico = 7800 kg/cm<sup>3</sup> E=200000 MPa

Materiale 2 (lega titanio):

carico di rottura 990 MPa; carico di snervamento = 840 Mpa

peso specifico = 4400 kg/cm<sup>3</sup> E=120000 MPa



## Esempio



Per dimensionare con ciclo alterno simmetrico:

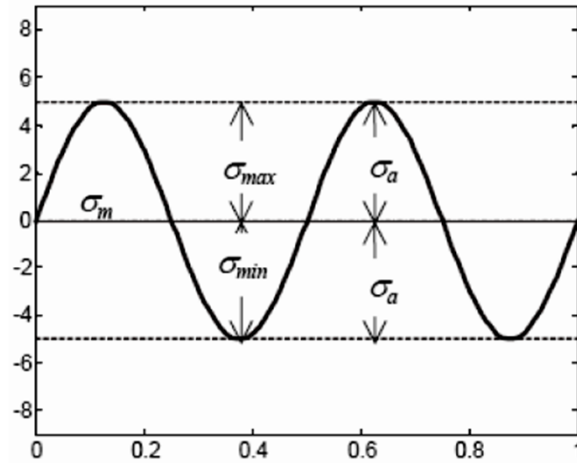
$$K_f \sigma_a = \frac{\sigma_{al}}{n}$$



### Effetto DEL CARICO MEDIO



ciclo alterno-simmetrico:  $R = -1$



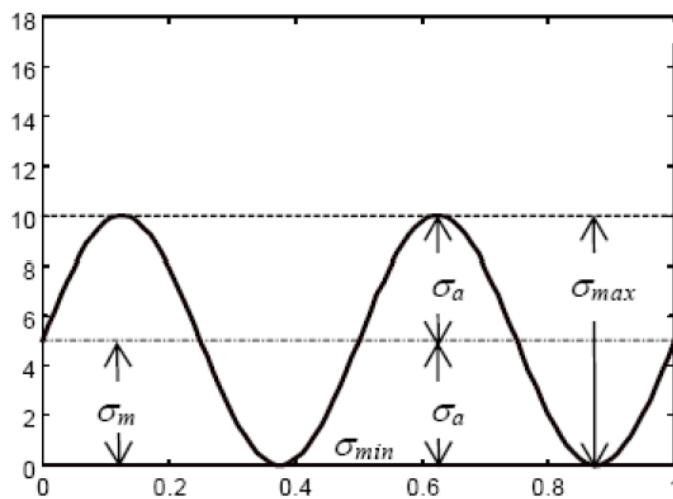
35



### Effetto DEL CARICO MEDIO



ciclo pulsante dall'origine:  $R=0$



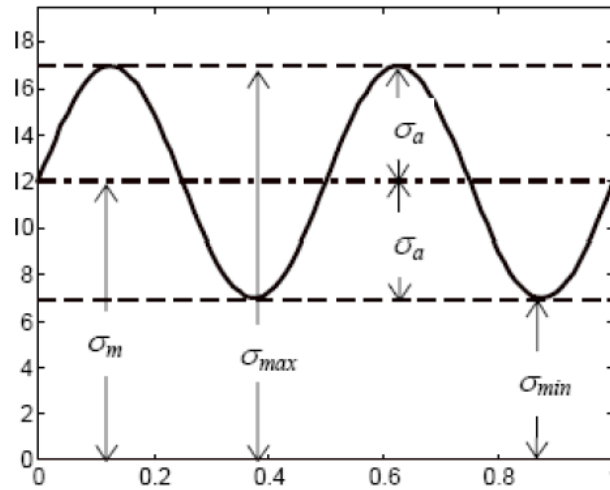
36



### Effetto DEL CARICO MEDIO



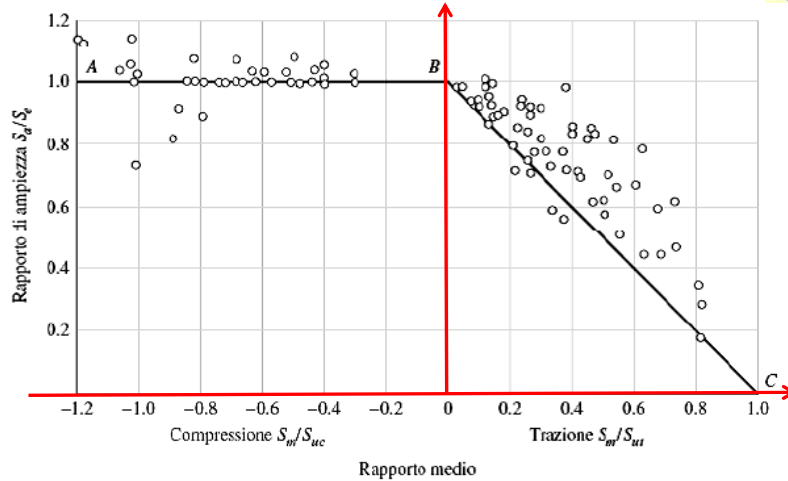
ciclo generico: in questo caso  $R=0.412$



37



### Effetto DEL CARICO MEDIO



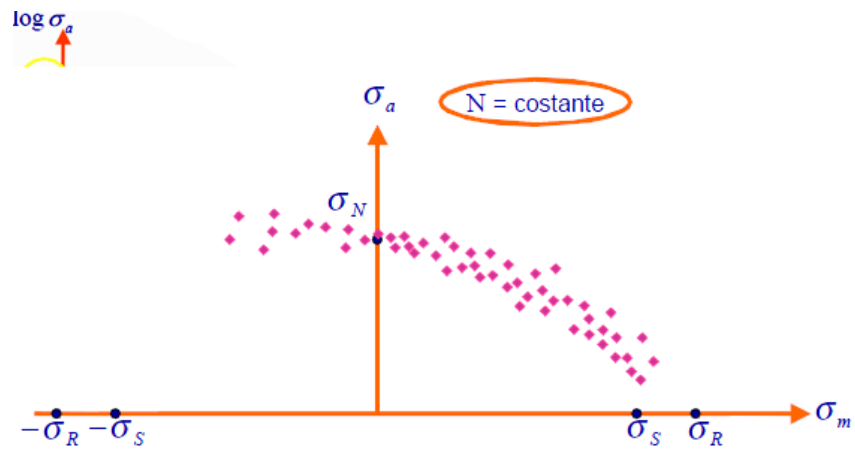
Shigley - Progetto e costruzione di macchine 2/ed  
Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett

Copyright © 2009 - The McGraw-Hill Companies

38



### Effetto DEL CARICO MEDIO



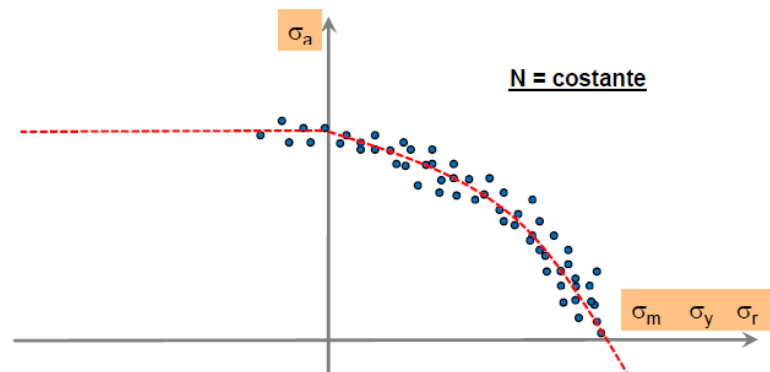
39



### Effetto DEL CARICO MEDIO



Scelto  $N$  ed effettuate prove di fatica con cicli aventi carichi medi variabili:

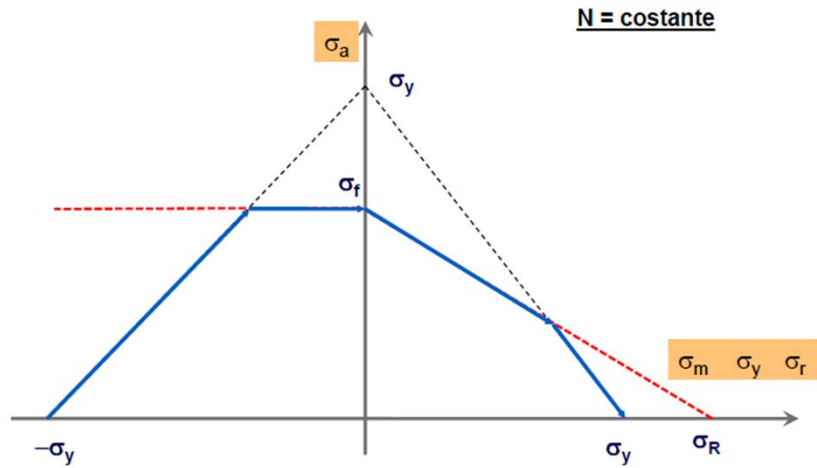


**N.B. sull'asse delle ordinate ( $\sigma_m=0$ ) si ha il ciclo alterno simmetrico**

40



### Diagramma di Haig



41

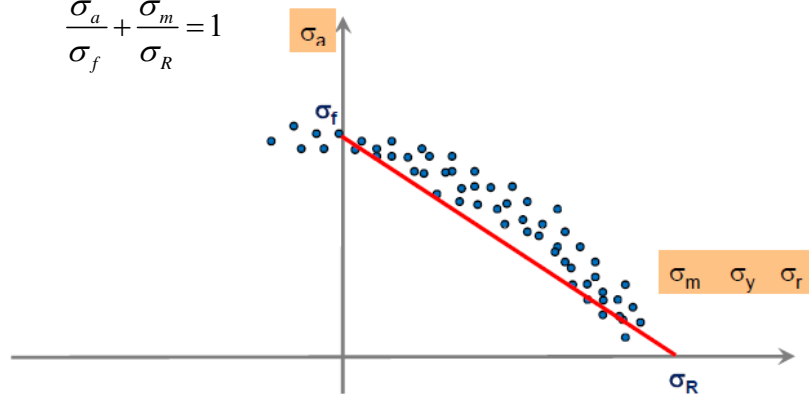


### Diagramma di Goodman



$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_R} = 1$$

N = costante



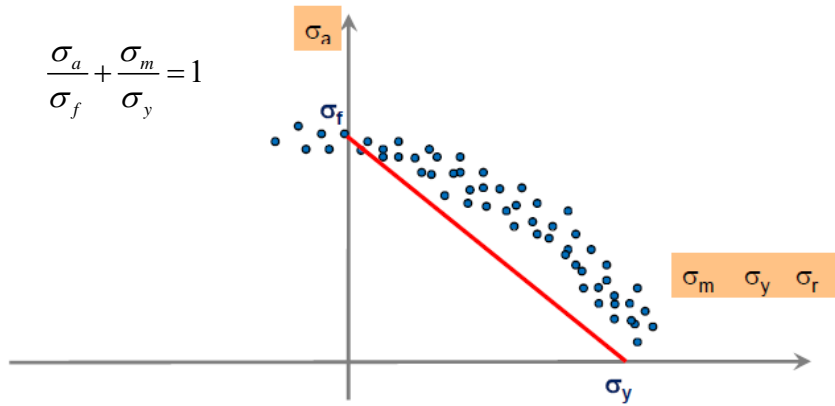
42



### Diagramma di Sodeberg



$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1$$



43

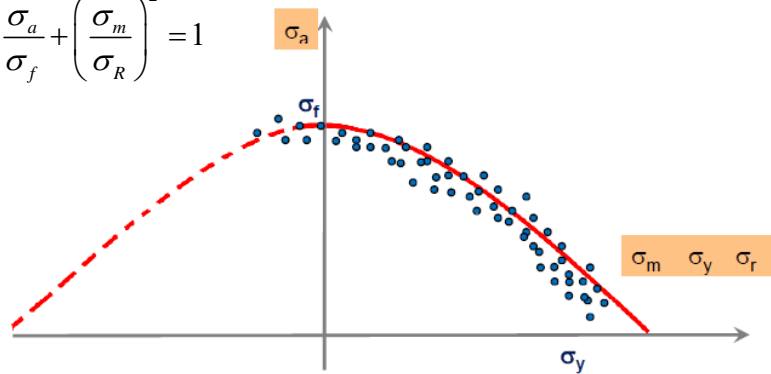


### Curva di Gerber



N = costante

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_R} \right)^2 = 1$$



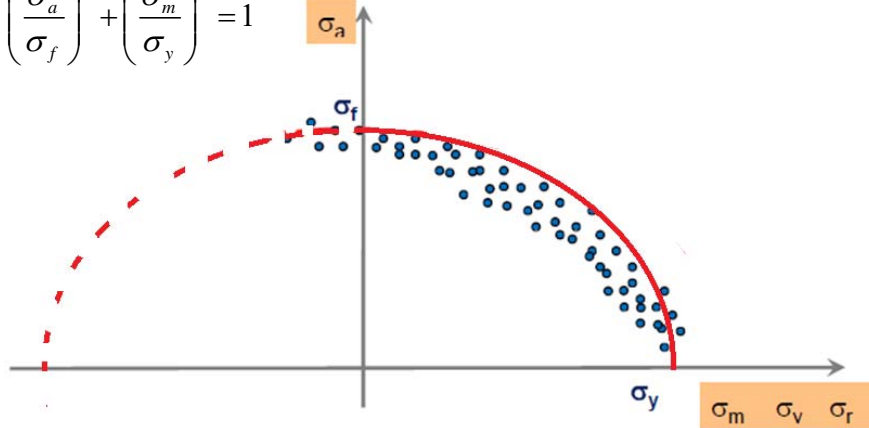
44



### Curva ellittica (ASME)



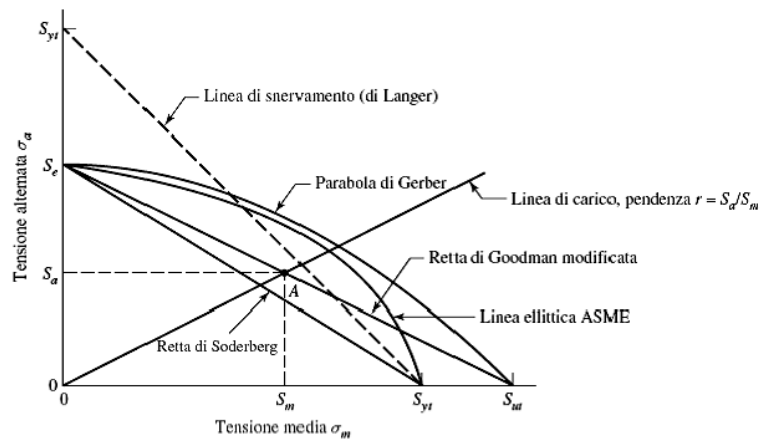
$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right)^2 = 1$$



45



### Curve per effetto carico medio



Shigley - Progetto e costruzione di macchine 2/ed  
 Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett

Copyright © 2009 - The McGraw-Hill Companies

46



## Curve per effetto carico medio



Criterio	Goodman	Soderberg	Gerber	ASME
Tipo della equazione	$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1$	$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1$	$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \frac{y}{b} = 1$	$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1$
Espressione del criterio	$\frac{\sigma_m}{\sigma_r} + \frac{\sigma_a}{\sigma_f} = 1$	$\frac{\sigma_m}{\sigma_s} + \frac{\sigma_a}{\sigma_f} = 1$	$\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_r}\right)^2 + \frac{\sigma_a}{\sigma_f} = 1$	$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_s}\right)^2 = 1$
Espressione di $\sigma_f$	$\sigma_f = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m/\sigma_r}$	$\sigma_f = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m/\sigma_s}$	$\sigma_f = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m^2/\sigma_r^2}$	$\sigma_f = \sigma_a \sqrt{\frac{1}{1 - \sigma_m^2/\sigma_r^2}}$

47

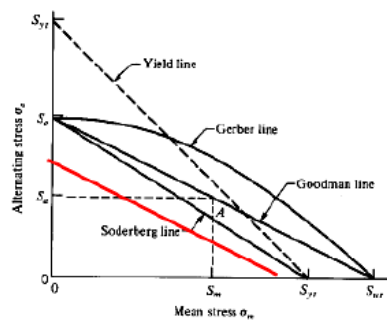


## Curve per effetto carico medio



$$\frac{k_f S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$$

Any combination of mean and alternating stress that lies on or below Goodman line will have infinite life.



### Factor of Safety Format

$$\frac{k_f S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = \frac{1}{N_f}$$

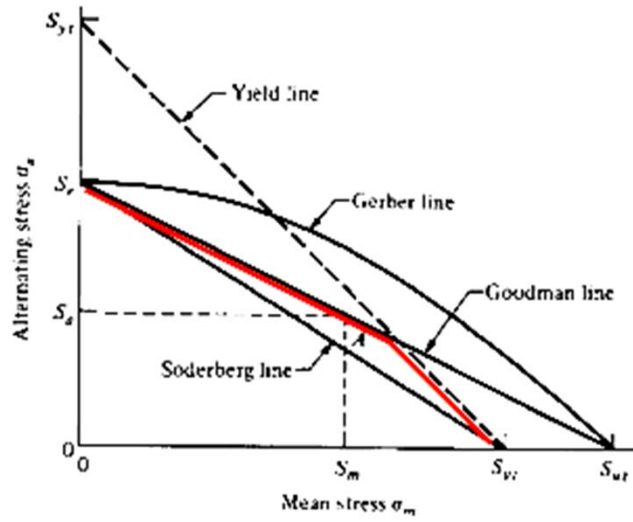
**Note that the fatigue stress concentration factor is applied only to the alternating component.**

48





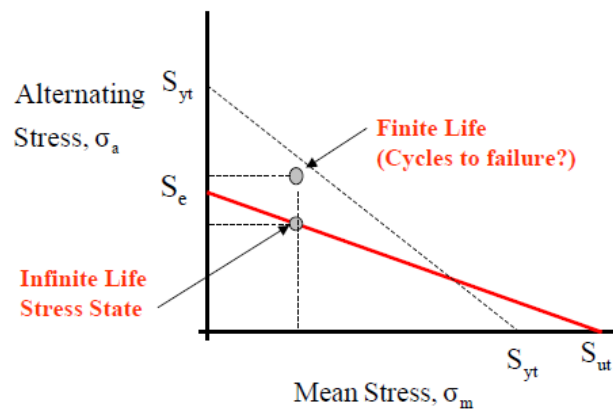
• Goodman modificato



49



Effetto del carico medio

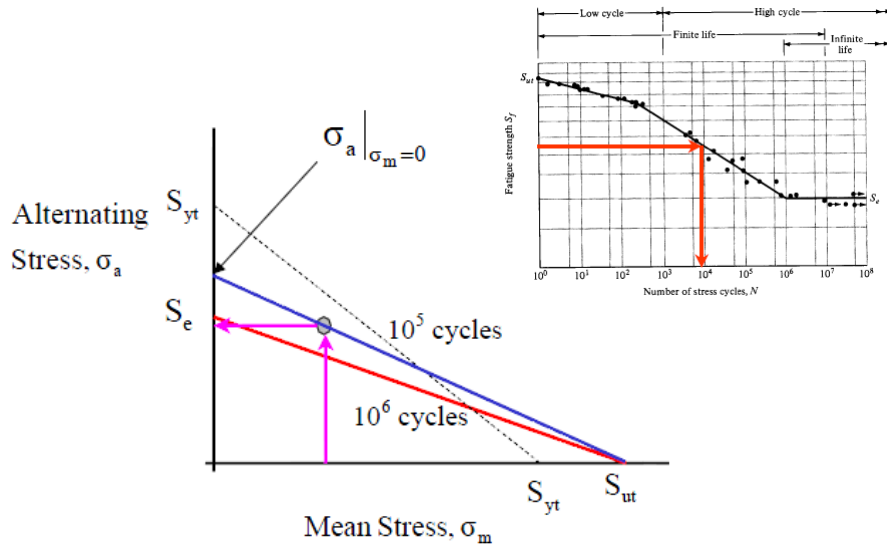


**Goodman Diagram**

50



### Ciclo alterno simmetrico equivalente



51



### Ciclo alterno simmetrico equivalente



$$\frac{k_f \sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{N_f}$$

$$\frac{k_f \sigma_a}{\sigma_a |_{\sigma_m=0}} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{N_f}$$

$$\sigma_a |_{\sigma_m=0} = \frac{k_f \sigma_a}{\frac{1}{N_f} - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

Questo per Goodman. Discorso analogo per le altre curve

52