



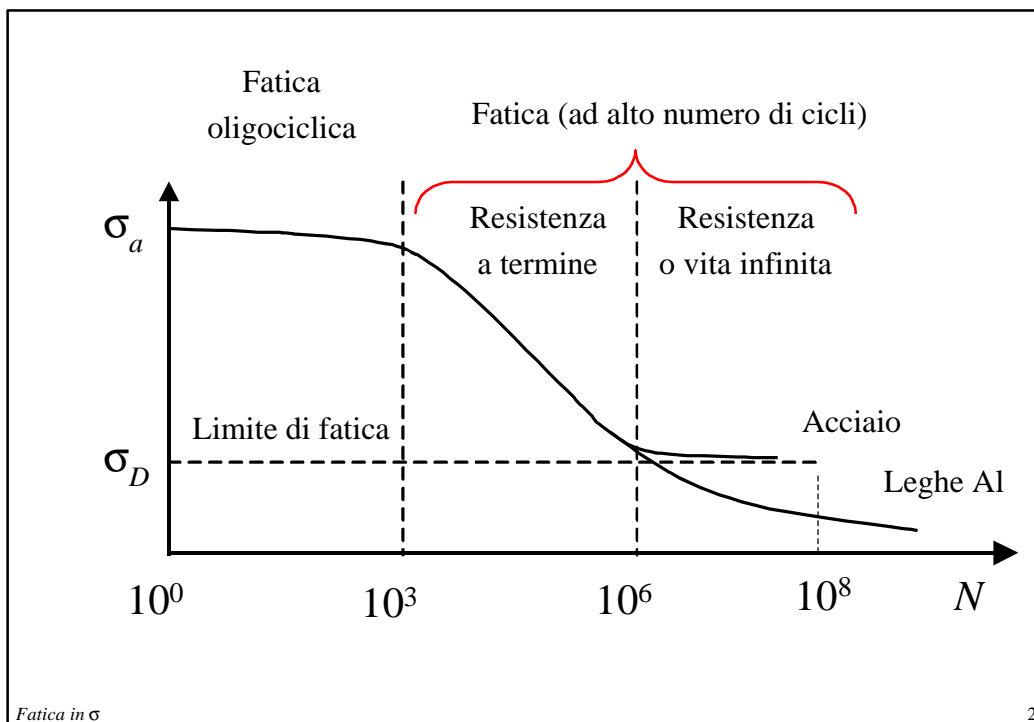
Fatica in σ - High Cycle Fatigue (HCF)

Diagrammi per la rappresentazione dei dati di fatica

- i dati di fatica di base sono ottenuti da prove con sollecitazioni nominali uniassiali ad ampiezza costante;
- le prove possono essere condotte sia su provette sia su componenti in grandezza naturale o in scala;
- i dati di fatica di base sono rappresentati nei diagrammi di Wöhler o diagrammi $S-N$

Fatica in σ

1



Fatica in σ

2



Prove in flessione rotante

Diagramma momento flettente

Diagramma momento flettente

Provetta su quattro appoggi

Provetta a sbalzo

Fatica in σ

3

Prove in flessione piana

Regolazione componente alternata

Regolazione componente media

Prove in trazione - compressione

Possano essere effettuate anche prove in torsione alternata

Condizioni standard:

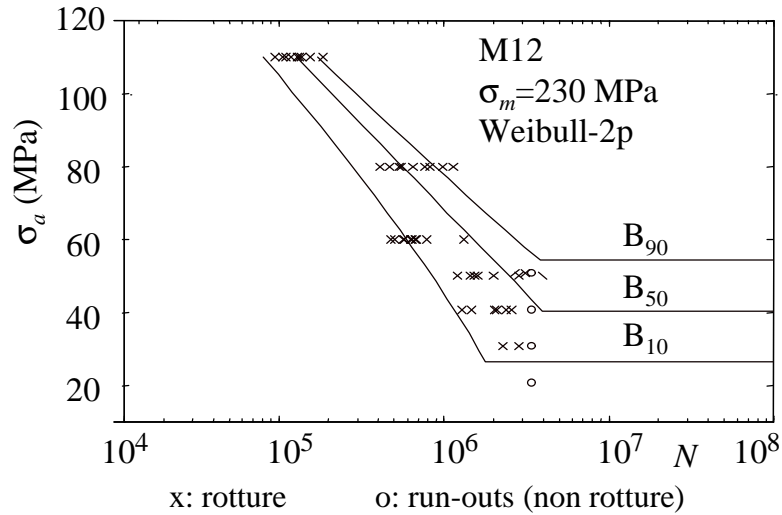
- flessione rotante ($\sigma_m = 0$, corrispondente a $R = -1$),
- provetta di diametro 10 mm circa,
- superficie lucidata.

Fatica in σ

4



Aspetti probabilistici della fatica – Curve SNP



Fatica in σ

5

Il metodo stair case

M8 Prove di fatica $\sigma_m = 400 \text{ MPa}$ "senza difetti"																	
$d =$	10	MPa	1 = Rotta; 0 = Non rotta												$N = 5 \cdot 10^6$		
esito	σ_a	MPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	MPa															
3	0	60										1		1		1	
4	3	50	1		1				1	0		0		0		1	
1	3	40		0		1			0	0							
0	1	30						0									
tot	8	7	Evento meno frequente					Non Rotta									

i	n	i_n	i_{2n}
3	0	0	0
2	3	6	12
1	3	3	3
0	1	0	0
N = 7		A = 9	B = 15

$$\sigma_{N(50\%)} = \sigma_0 + d \left(\frac{A}{N} \pm 0.5 \right) \quad \begin{array}{l} + : \text{evento meno frequente non rotto} \\ - : \text{evento meno frequente rottura} \end{array}$$

$$\text{se } \frac{NB - A^2}{N^2} > 0.3 \quad s = 1.62d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \right) \quad \text{altrimenti } s = 0.53 \cdot d$$

$$\sigma_{N(10\%)} = \sigma_{N(50\%)} - 1.28 \cdot s \quad \sigma_{N(90\%)} = \sigma_{N(50\%)} + 1.28 \cdot s$$

Fatica in σ

6

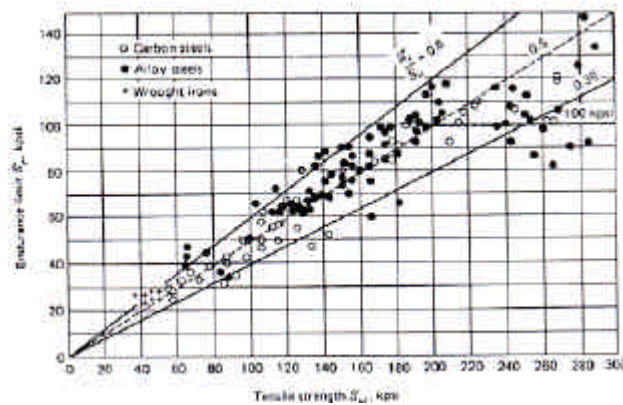


Limite di fatica e resistenza statica

Criterio di Bach $s_{D-1} = 0.5 \cdot R_m$ $s_{D0} = 0.3 \cdot R_m$

Criterio di Fuchs $\sigma_{D-1} = 0.5 \cdot R_m$ ($R_m < 1400$ MPa)

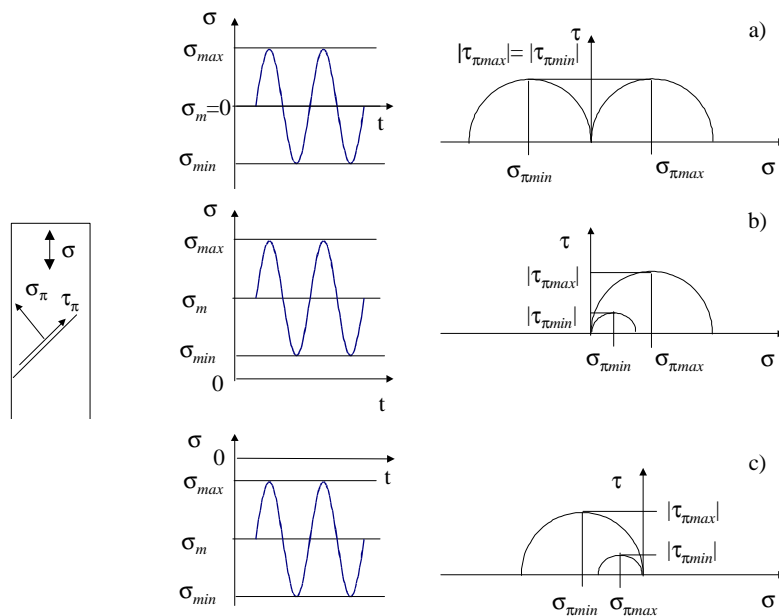
$\sigma_{D-1} = 700$ MPa ($R_m \geq 1400$ MPa)



Fatica in σ

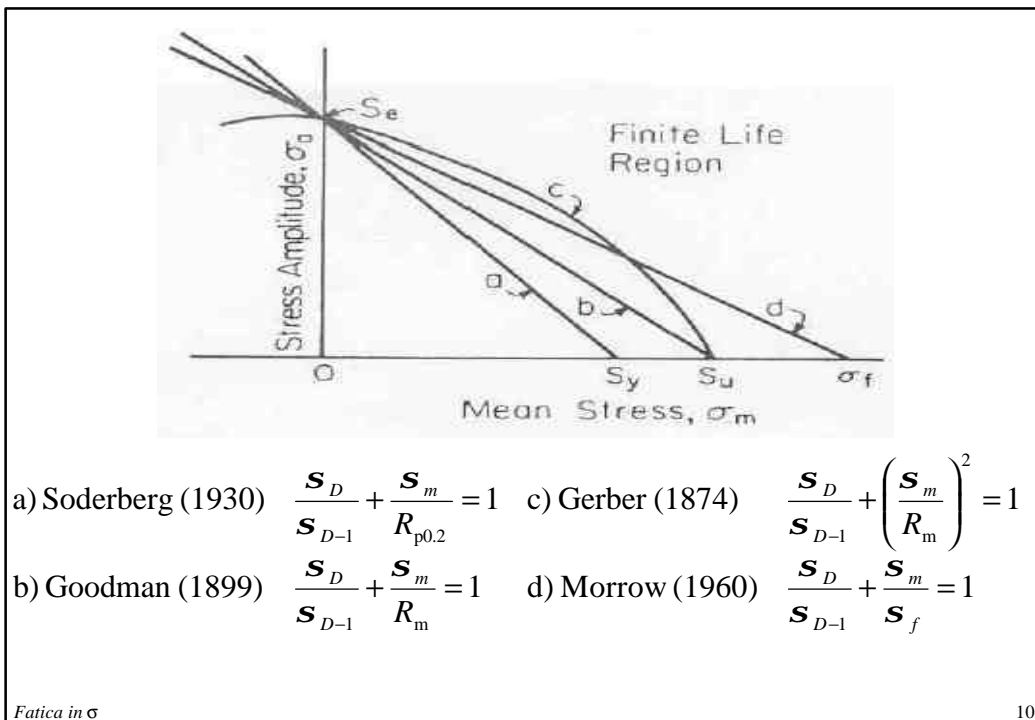
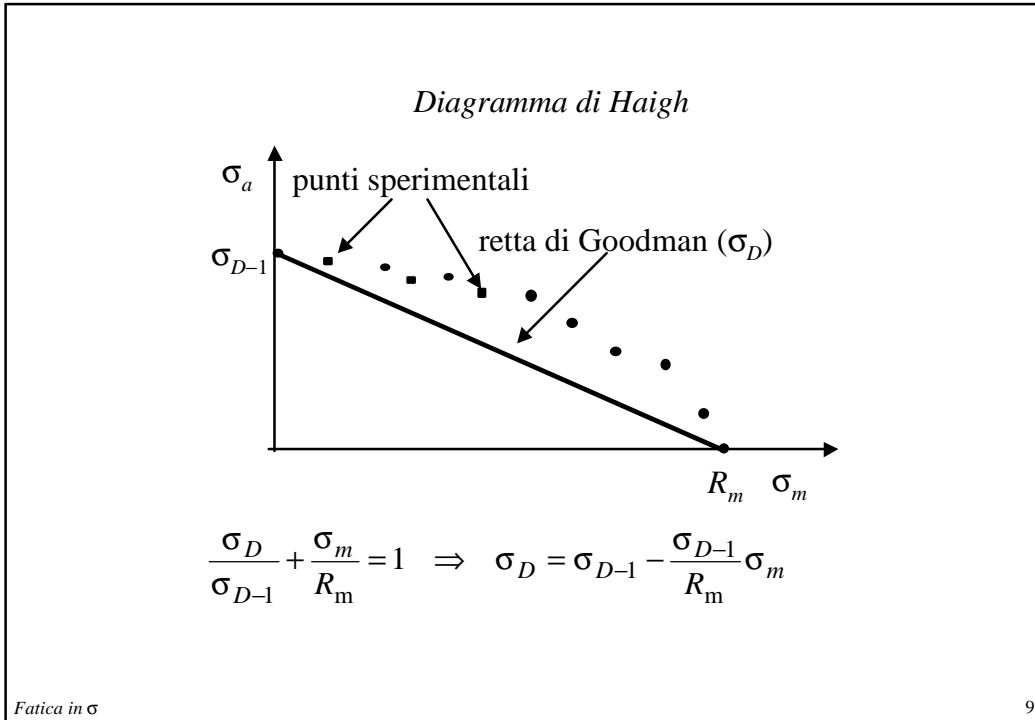
7

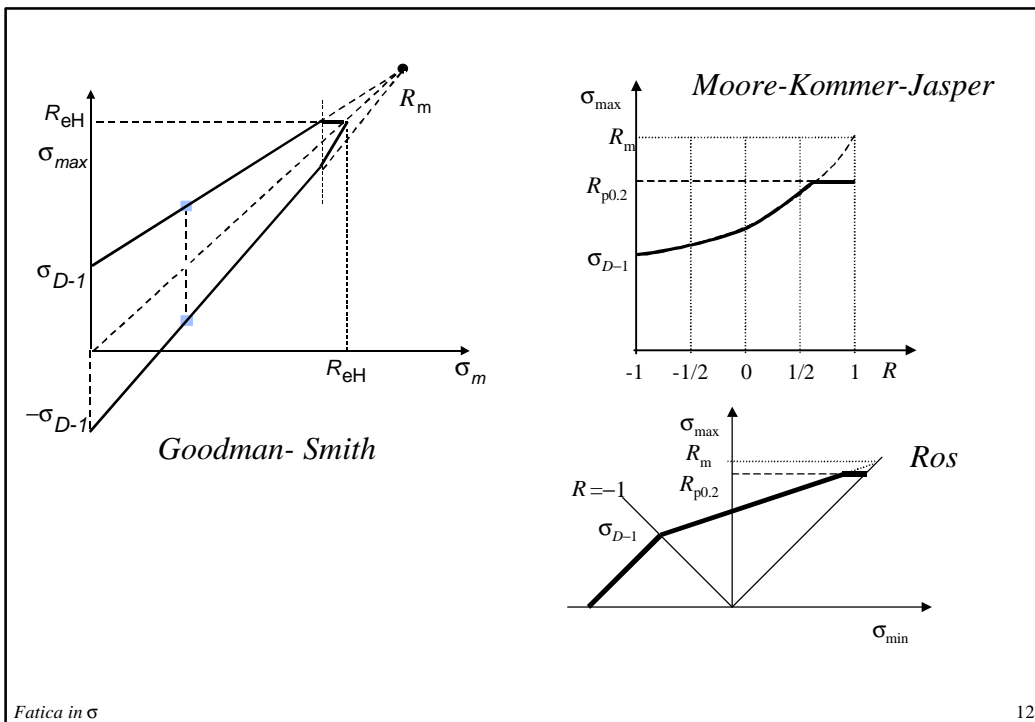
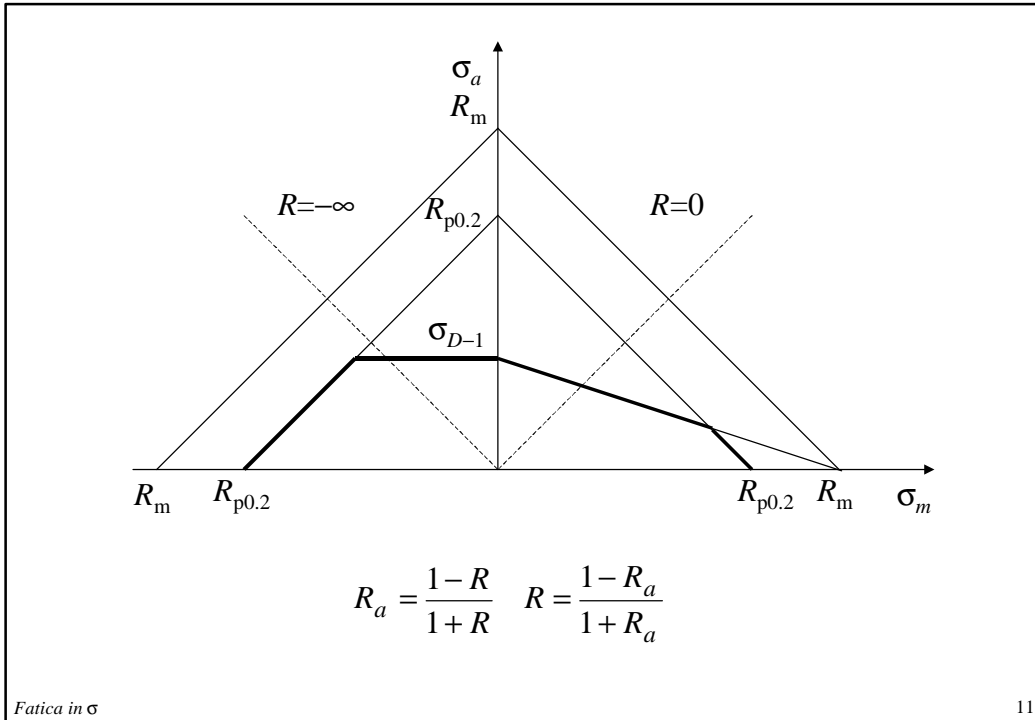
Influenza della tensione media - Diagrammi di fatica

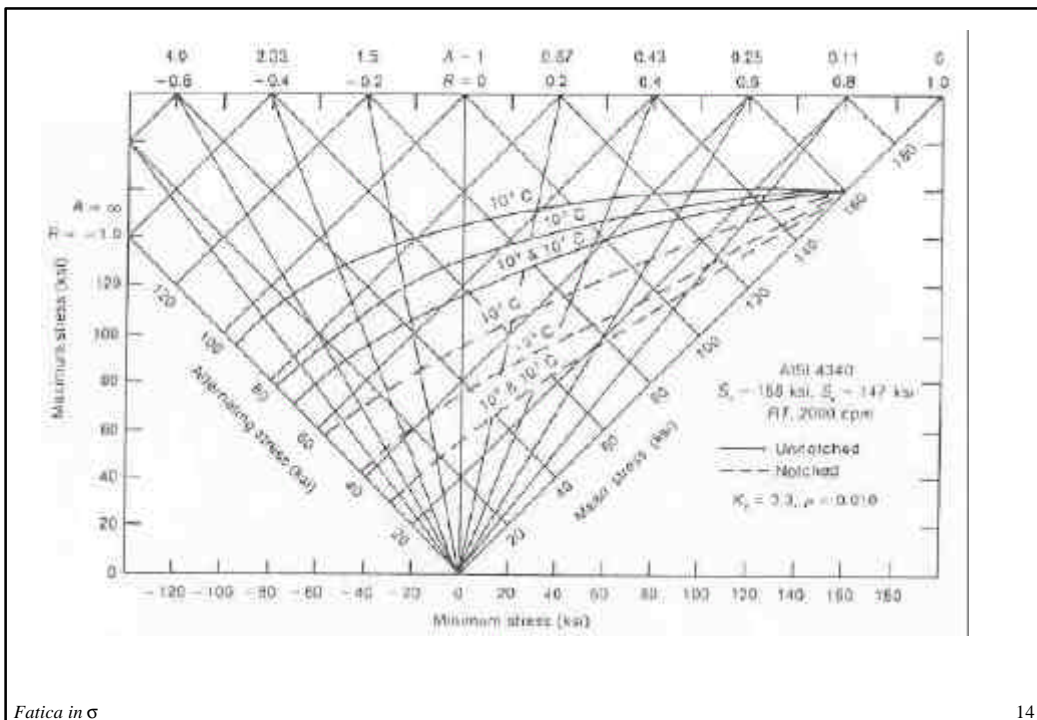
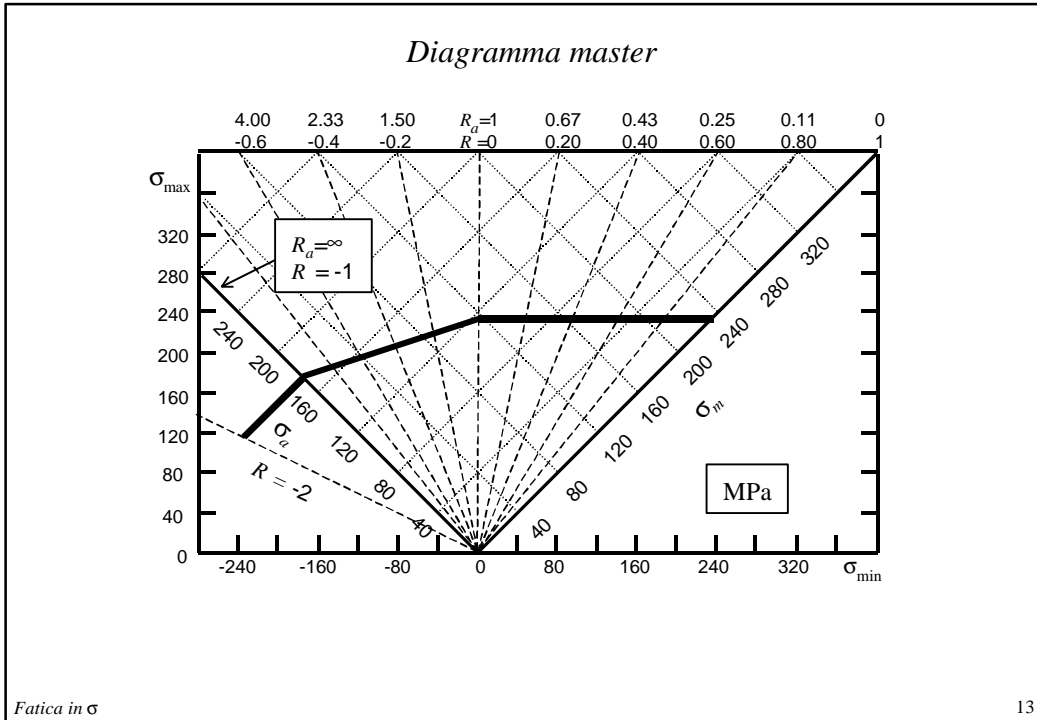


Fatica in σ

8





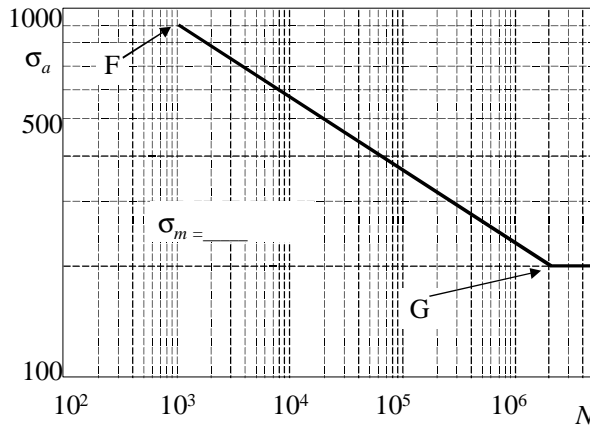




Stima diagrammi SN

Diagrammi log-log

$$F: (N_F, \sigma_F) = (10^3, 0.9(R_m - \sigma_m)) \quad G: (N_G, \sigma_G) = (N_G, \sigma_D)$$

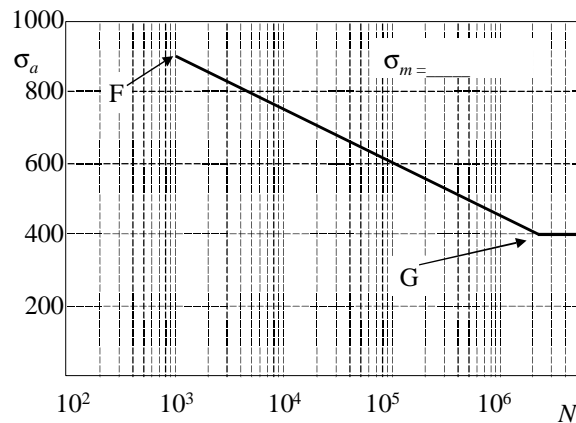


NB:
Alcuni autori, dalla parte
della sicurezza pongono
 $F = (1, R_m)$

$$N\sigma_a^k = B \quad \text{ovvero} \quad \log(N) = \log(B) - k \log(\sigma_a)$$

$$\sigma_a = AN^b \quad \text{ovvero} \quad \log(\sigma_a) = \log(A) + b \log(N)$$

Diagrammi semi-log

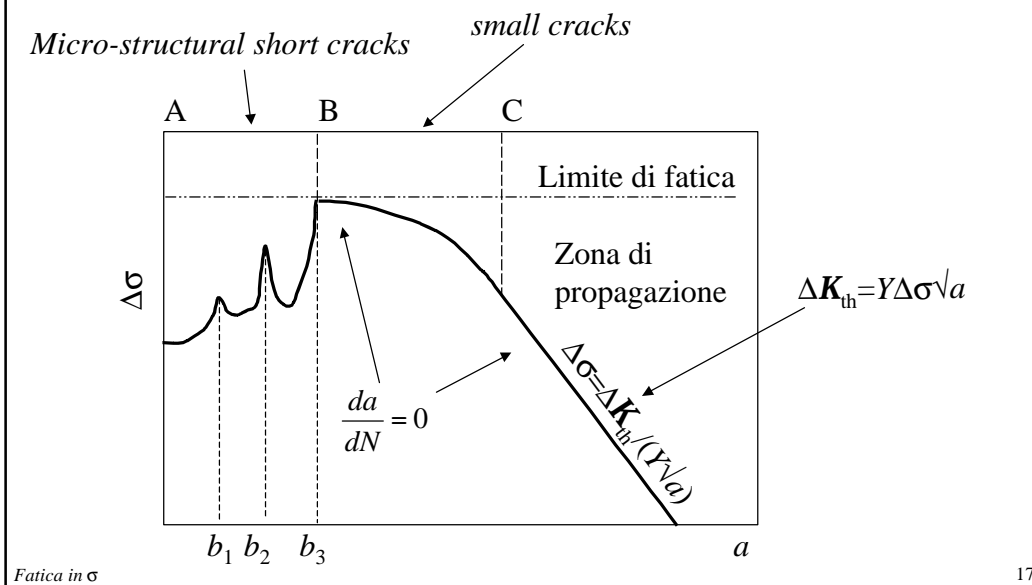


$$\sigma_a = \sigma_F - \frac{\sigma_F - \sigma_D}{\log N_G - \log N_F} (\log N - \log N_F)$$

$$\log N = \log N_F + \frac{\sigma_F - \sigma_a}{\sigma_F - \sigma_D} (\log N_G - \log N_F)$$



Diagramma di Kitagawa e Takahashi (1976)
una spiegazione qualitativa del limite di fatica



DAI PROVINI AI COMPONENTI

Vi sono molti fattori che influenzano la resistenza a fatica; fra i fattori che riguardano il componente hanno particolare importanza:

- le dimensioni
- la presenza di intagli
- la finitura superficiale (rugosità)
- i trattamenti superficiali (meccanici, termici e/o chimici, rivestimenti)

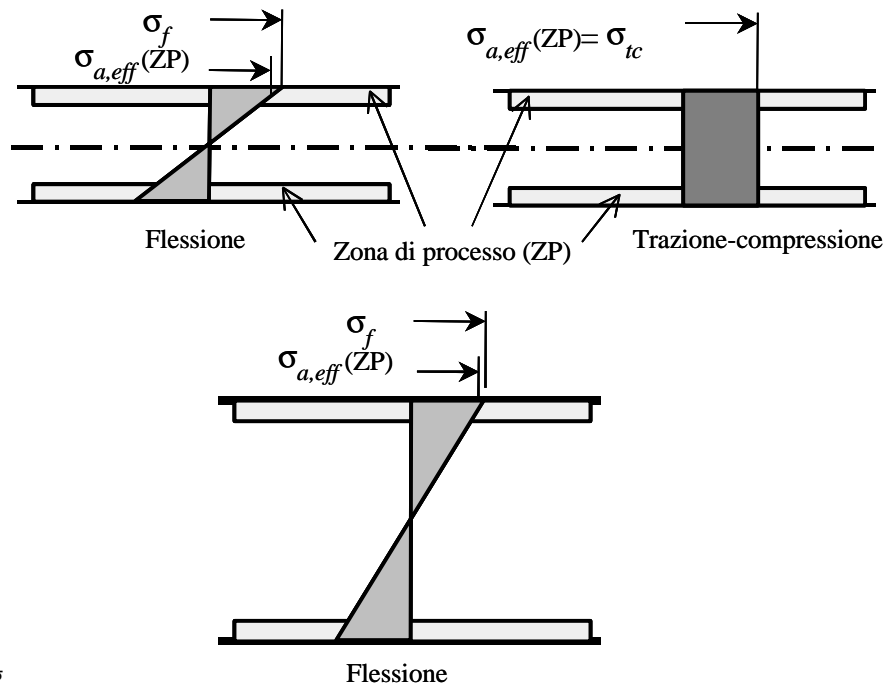
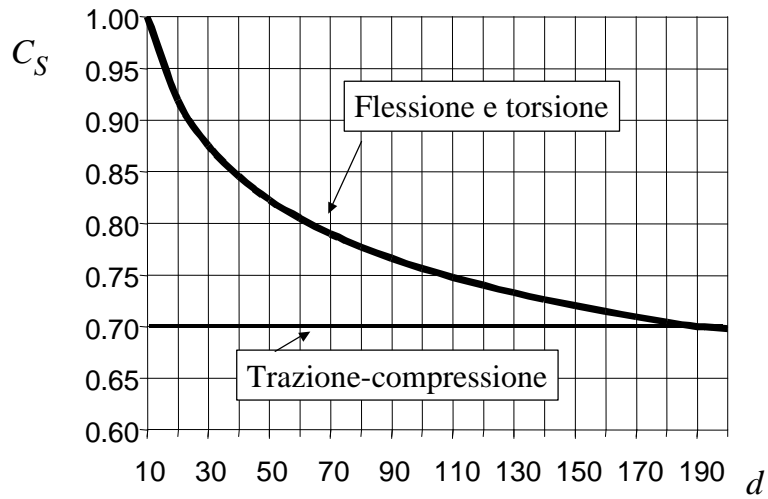
e fra quelli che riguardano le condizioni di utilizzo:

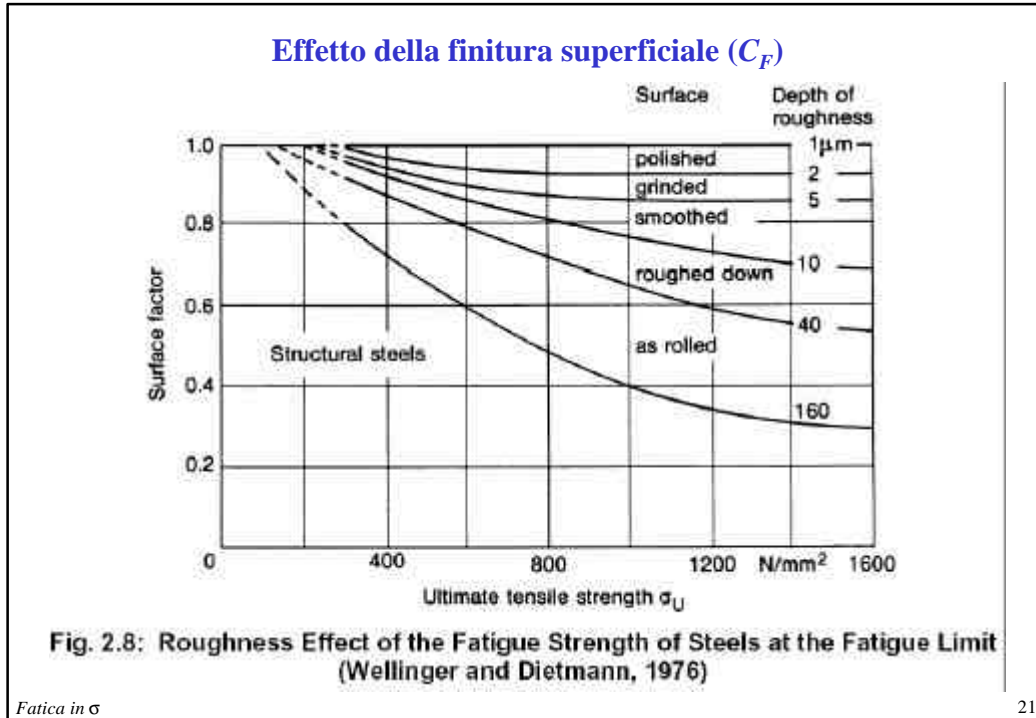
- il tipo di carico:
- la temperatura di esercizio
- la presenza di un ambiente corrosivo.

$$s_{D-1} = s_{D-1}^* \cdot \frac{\prod C_i}{K_f} = \frac{s_{D-1}^*}{\prod K_i}$$



Effetto delle dimensioni (effetto scala) (C_S)





Torsione
(stato di tensione biassiale trattato come monoassiale)

Materiale	Valori sper.	Def . max	Tresca	Von Mises
Acciai al C e legati da bonifica	0.6	0.77	0.50	0.58*
Ghise grigie	0.85	0.76÷0.82*	0.50	0.58
Ghise malleabili	0.84	0.79*	0.50	0.58
Leghe leggere (Al)	0.57	0.73	0.50	0.58*
Rame	0.53	0.80	0.50*	0.58
Ottone	0.57	0.70÷0.76	0.50	0.58*
Bronzo	0.57	0.84	0.50	0.58*
Lega TiAl6V4	0.62	0.71	0.50	0.58*

Rapporti τ_{D-1}/σ_{D-1} sperimentali e teorici



Fatica in σ 22



Effetto dei trattamenti superficiali

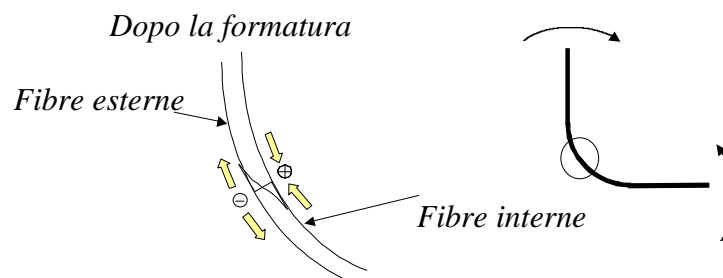
- I trattamenti superficiali sono importanti perché l'innesco del processo di fatica avviene, di norma, sulla superficie;
- la variazione della resistenza a fatica si verifica nei casi con gradiente di tensione, è molto più limitata nel caso di sollecitazione uniforme nella sezione;
- i principali trattamenti si dividono in:
 - trattamenti meccanici
 - trattamenti di rivestimento
 - trattamenti termici
- **tutti i trattamenti che inducono uno stato di tensione residua di compressione in superficie hanno effetto benefico in termini di resistenza a fatica**

Trattamenti meccanici

- **Pallinatura**: crea tensioni residue di compressione grazie al bombardamento della superficie con sferette di acciaio proiettate (forza centrifuga o aria compressa) 
 - la profondità della zona interessata dalle tensioni residue di compressione è di circa 1 mm
 - è più efficace su acciai di media durezza e ghise (20-35% di aumento del σ_{D-1}), meno su acciai duri e leghe leggere;
 - applicazione: molle a balestra 
- **Rullatura a freddo**: stesso effetto della pallinatura
 - la massima profondità della zona interessata dalle tensioni residue di compressione è di circa 10 mm
 - lascia una superficie più uniforme
 - applicazione: filettatura viti, raccordo perno-maschetta negli alberi a gomiti



- **Formatura (e rullatura) a caldo:** ha un effetto negativo perchè è accompagnata da decarburazione superficiale
 - diminuisce la resistenza dello strato superficiale
 - diminuisce il volume dello strato superficiale la cui contrazione viene impedita dal materiale sottostante
 - si creano quindi pericolose tensioni residue di trazione
- **Formatura a freddo (delle lamiere):** genera uno stato di tensione residuo di compressione da un lato, di trazione dall'altro: attenzione all'effetto di tali tensioni.



Fatica in σ

25

Rivestimenti superficiali

Sono applicati per risolvere problemi di corrosione, di usura e per ragioni estetiche

- **Cromatura e nichelatura:** sono i più diffusi
 - inducono uno stato di tensioni residue di trazione, diminuiscono sensibilmente la resistenza a fatica, l'effetto è tanto maggiore quanto più:
 - è altoresistente il materiale
 - si considerano durate più lunghe
 - aumenta lo spessore del rivestimento
 - si ovvia con accorgimenti quali trattamenti di nitrurazione o pallinatura preventivi
 - la nichelatura è più sensibile della cromatura a questi accorgimenti

Fatica in σ

26



- **Cadmatura e zincatura:**

non hanno effetti sulla resistenza a fatica

- si utilizzano per evitare problemi di corrosione
- non hanno una buona resistenza all'usura

I trattamenti di elettrolitico, nel caso di materiali metallici possono, se non accuratamente controllati, causare infragilimento da idrogeno

- **Anodizzazione:** è il trattamento tipico delle leghe leggere

- crea una pellicola fragile che si può rompere sotto carichi ciclici, innescando il processo di fatica, in azione sinergica con la corrosione
- riduzione della resistenza a fatica del 20÷30%

Trattamenti termici

- **Cementazione e nitrurazione:** sono processi diffusivi con effetto benefico sulla resistenza a fatica

- generano un indurimento superficiale del materiale
- fanno aumentare di volume lo strato interessato dal processo che, a fine trattamento, si trova in uno stato di tensione residua di compressione
- lo strato interessato è dell'ordine di 1 mm

- **Tempra:** genera una trasformazione di fase con conseguente aumento di volume ed effetto benefico

- la tempra superficiale genera uno stato di tensione residua di compressione
- la tempra a induzione è molto efficace perché oltre allo strato superficiale in compressione, lascia il cuore tenace



Effetto della temperatura di esercizio

- **a bassa temperatura:**
 - i fenomeni plastici sono ostacolati, la fase di nucleazione è ostacolata e il limite di snervamento si innalza
 - diminuiscono la resilienza e la tenacità alla frattura e l'eventuale fase di propagazione si accorcia
- **ad alta temperatura:**
 - i fenomeni plastici sono facilitati e il limite di fatica può anche scomparire, aumenta la tenacità alla frattura e l'eventuale fase di propagazione si allunga
 - a temperature superiori al 60÷70% della temperatura (assoluta) di fusione diventano importanti fenomeni quali lo scorrimento plastico (creep), l'approccio classico basato sulle tensioni non è più applicabile

Effetto di un ambiente corrosivo

- L'ambiente corrosivo riduce drasticamente la durata di un componente;
- la temperatura gioca un ruolo notevole per l'influenza sulla velocità delle reazioni elettrochimiche;
- i materiali più altoresistenti sono più sensibili, mentre i materiali più duttili ne risentono in misura minore
- gli acciai con alto contenuto di cromo ne risentono in misura minore;
- si adottano trattamenti di cromatura, nichelatura, cadmiatura e zincatura che possono ridurre la resistenza a fatica in ambiente non corrosivo, ma la aumentano in ambiente corrosivo



Effetto degli intagli: Fattore di riduzione della vita a fatica

$$1 < \frac{\sigma_{D-1 \text{ provino liscio}}}{\sigma_{D-1 \text{ provino con intaglio}}} < K_t$$

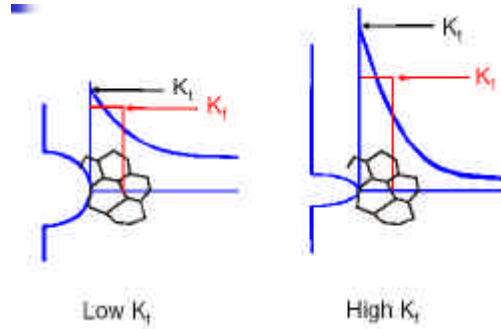
$$K_f = \frac{\sigma_{N \text{ provino liscio}}}{\sigma_{N \text{ provino intagliato}}} \quad \text{UNI 3964}$$

... rispetto alla condizione 'standard'

$$K_f = \frac{\sigma_{D-1 \text{ provino liscio}}}{\sigma_{D-1 \text{ provino intagliato}}}$$

K_f risente di:

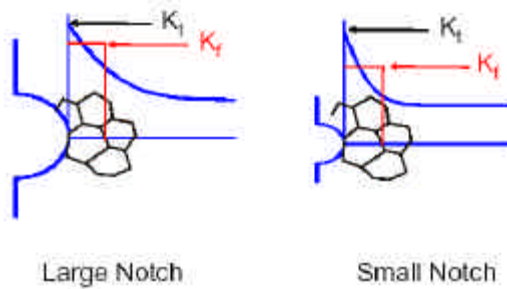
Gravosità dell'intaglio (K_t)



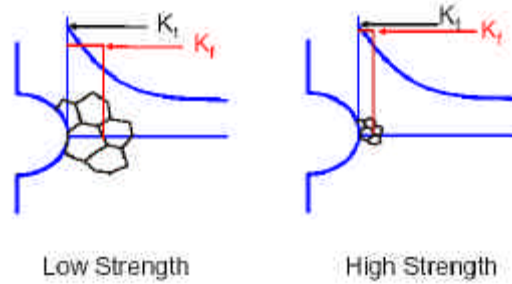
Fatica in σ

31

Scala dell'intaglio



Dimensione microstrutturale
(resistenza statica)



Fatica in σ

32

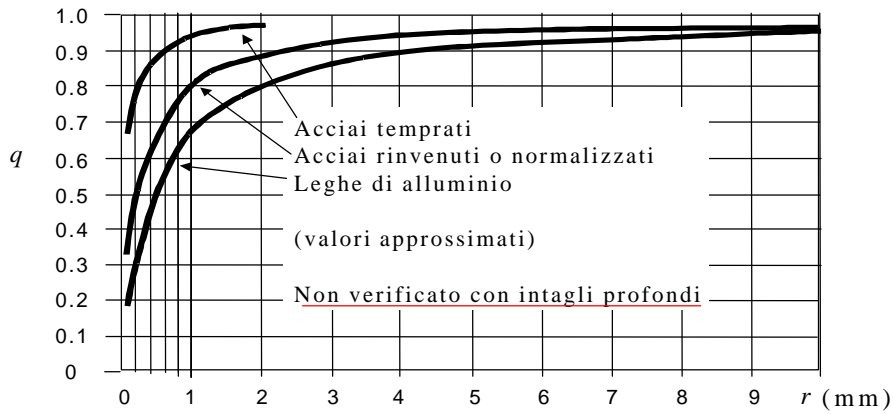


Stima:

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

q = sensibilità all'intaglio

r = raggio di fondo intaglio

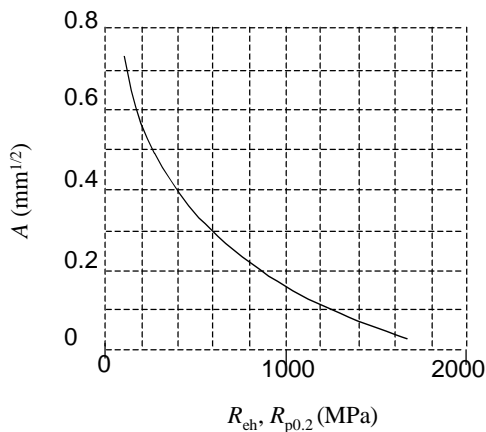


Fatica in σ

33

*Stima della sensibilità all'intaglio
(NKS)*

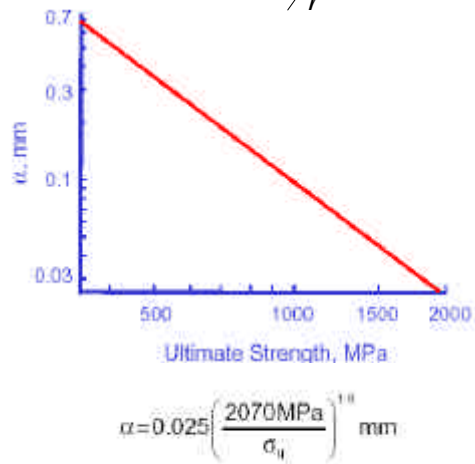
$$q = \frac{1}{1 + \frac{A}{\sqrt{r}}}$$



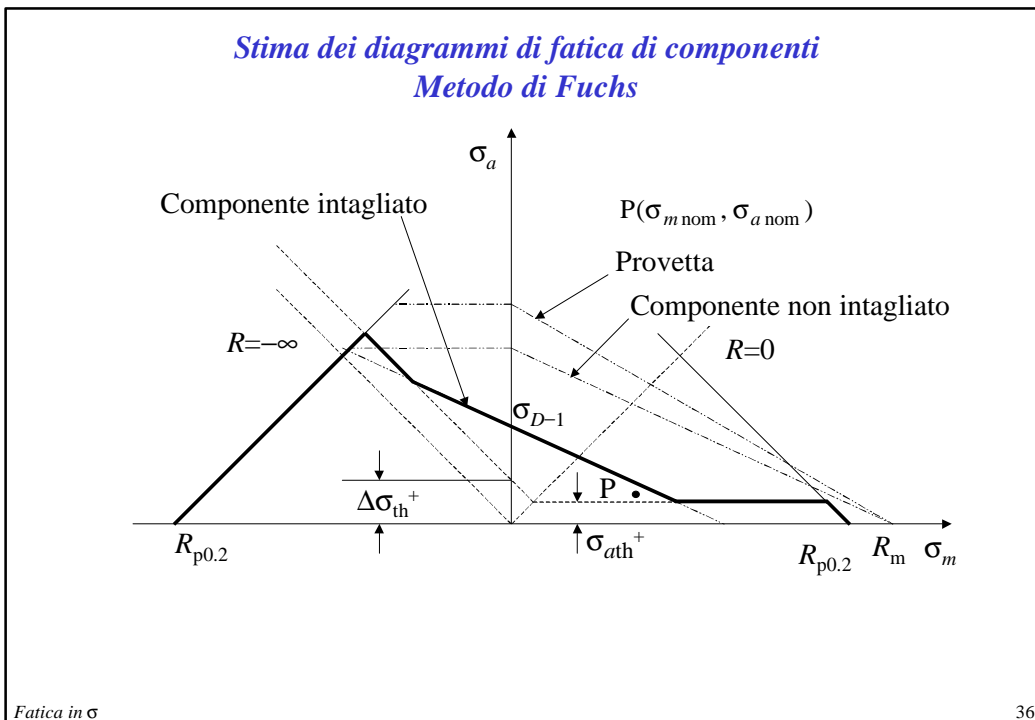
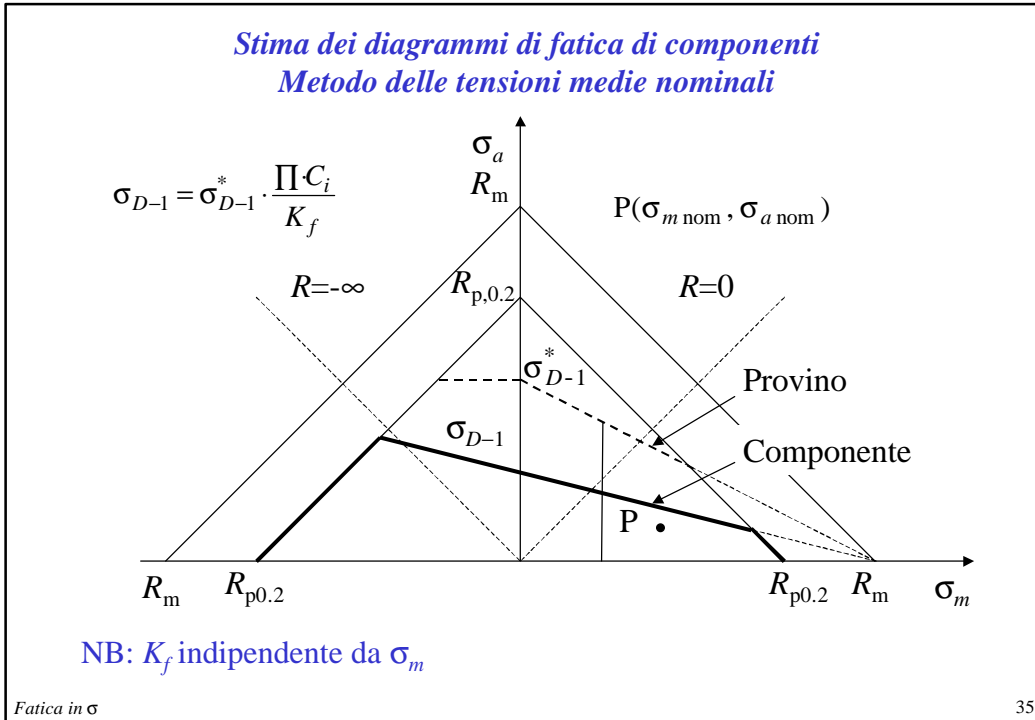
Fatica in σ

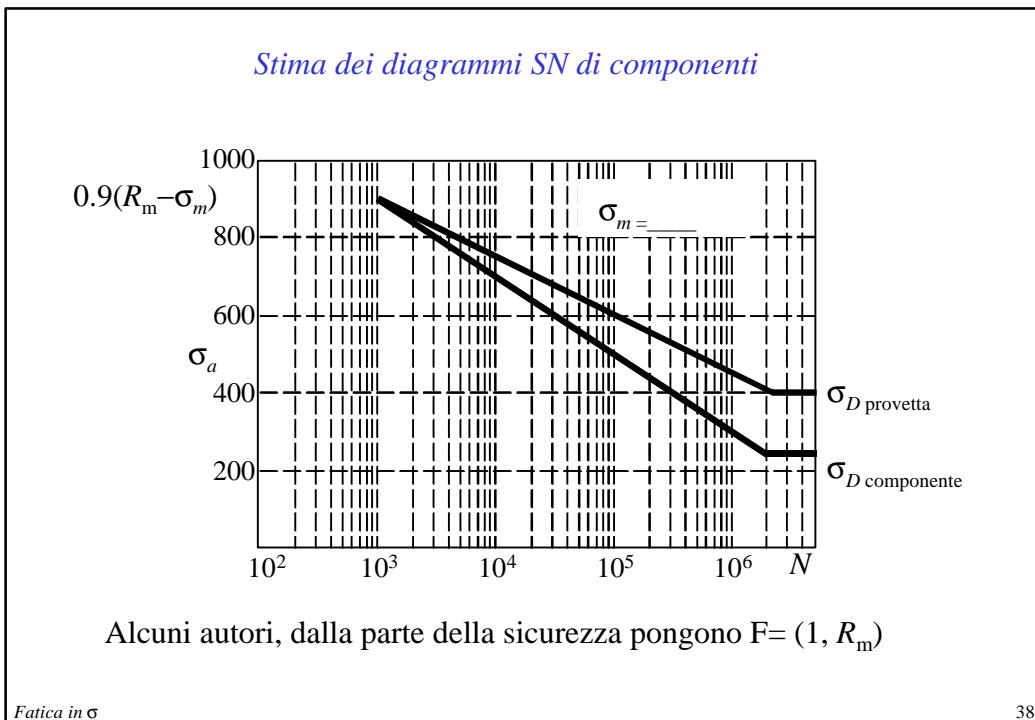
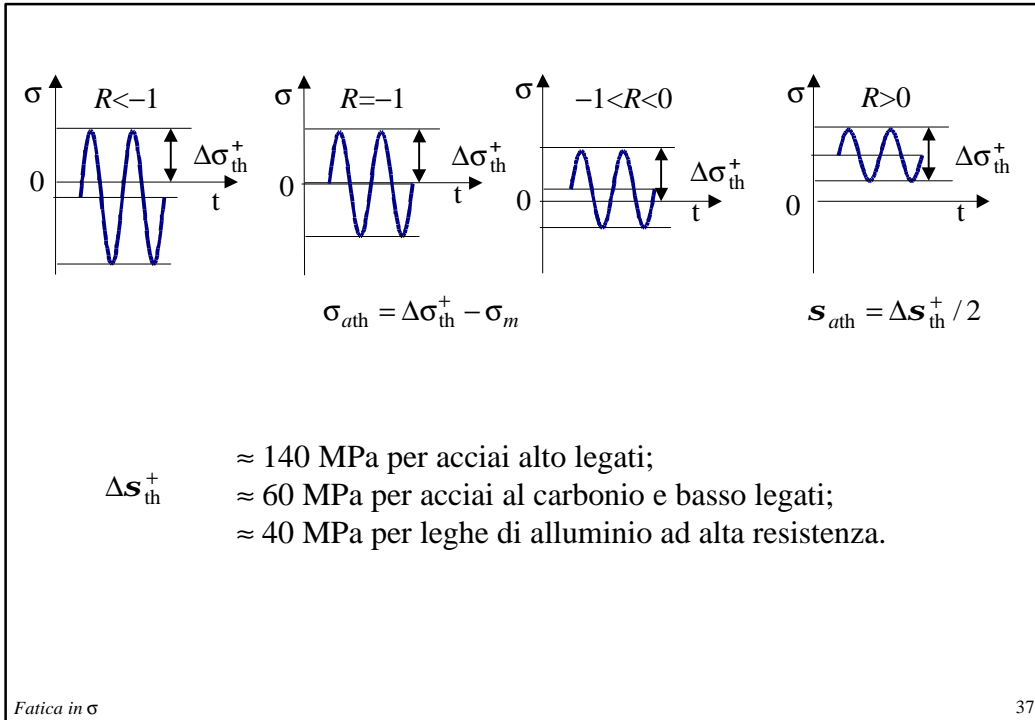
*Stima della sensibilità all'intaglio
(Peterson)*

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{r}}$$



34

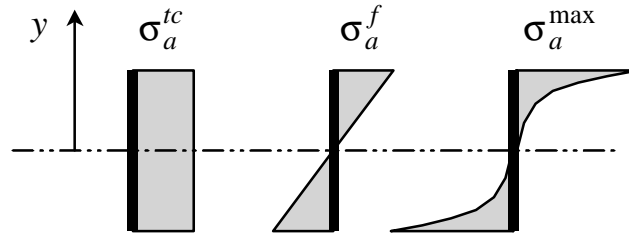






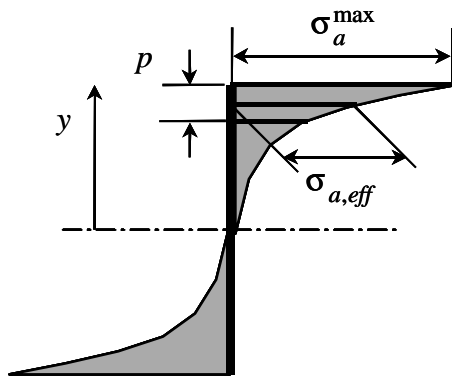
Teoria di Siebel e Stieler: valutazione dell'effetto del gradiente

Utilizzata in alcune norme VDI



Gradiente relativo:

$$c = \frac{1}{s^{\max}} \frac{ds}{dy}$$



$$s_{a,eff} = s_a^{\max} \frac{1}{1 + Ac^b} = \frac{s_a^{\max}}{d}$$

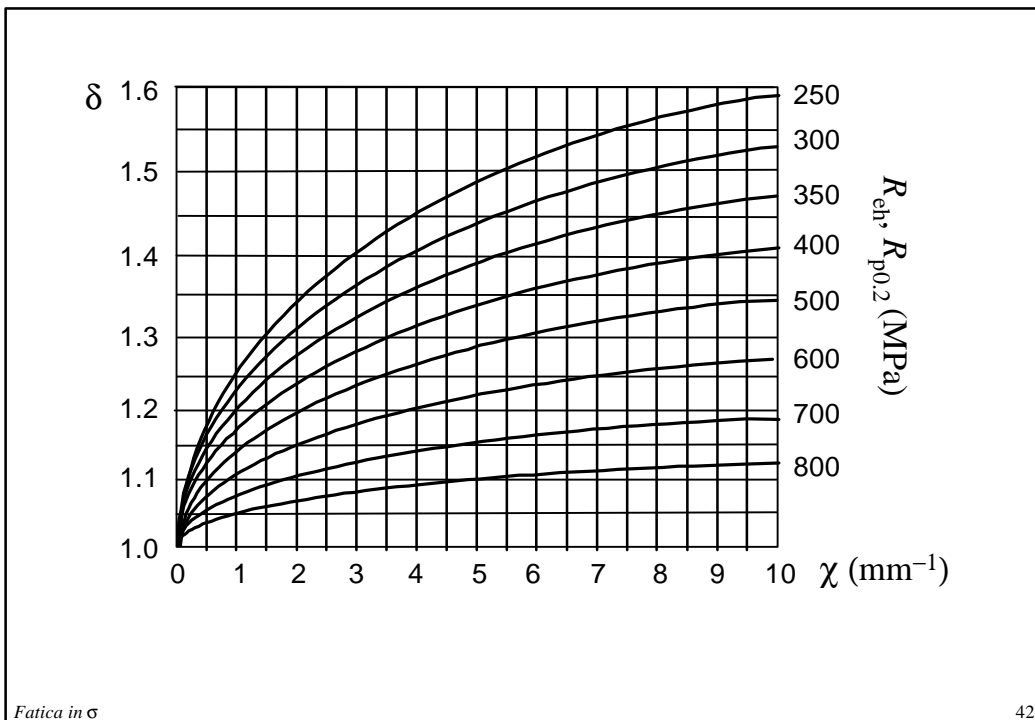
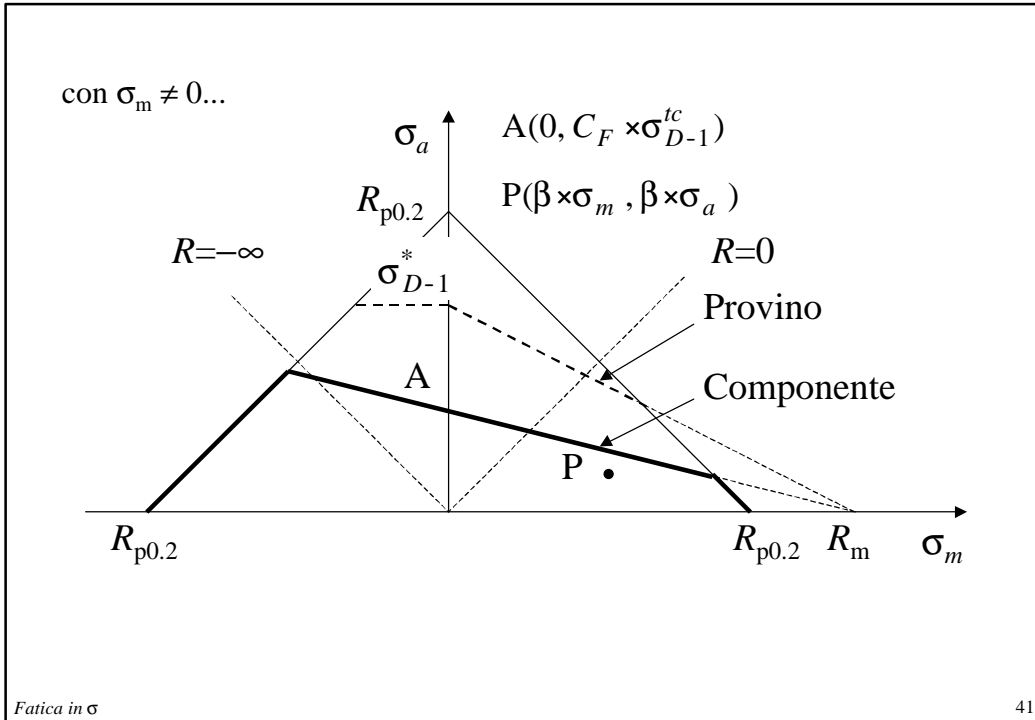
$$s_{a,eff} = \frac{s_a^{\max}}{d} = \frac{K_t}{d} s_a = b s_a$$

β = coefficiente d'intaglio
da applicare

- sia alla componente alternata
- sia alla componente media

con $\sigma_m = 0 \dots$

$$\sigma_{a,eff} = \frac{\sigma_a^{\max}}{\delta} = \frac{K_t}{\delta} \sigma_a = \beta \sigma_a < \sigma_{D-1}^{tc}$$





Flessione

$$\chi = \frac{2}{d} + \frac{2}{r}$$
$$\chi = \frac{4}{D+d} + \frac{2}{r}$$

Trazione-compressione

$$\chi = \frac{2}{r}$$

Torsione

$$\chi = \frac{4}{D+d} + \frac{1}{r}$$

Fatica in σ

43

Criteri per il calcolo del coefficiente di sicurezza per vita illimitata

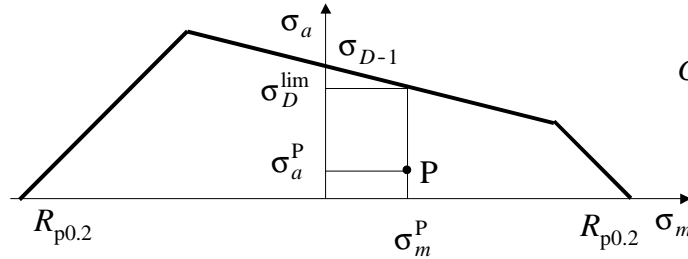
L'applicazione di un momento torcente costante nel tempo ad un albero è ininfluente rispetto alla resistenza a fatica, per cui anche se lo stato di sollecitazione è multiassiale (vi sono più tensioni principali non nulle) questo specifico caso viene trattato come uniassiale!

La definizione del coefficiente di sicurezza dipende dal modo in cui crescono le tensioni al crescere delle prestazioni richieste

Salvo diverse prescrizioni il coefficiente di sicurezza a fatica minimo è pari a 3!

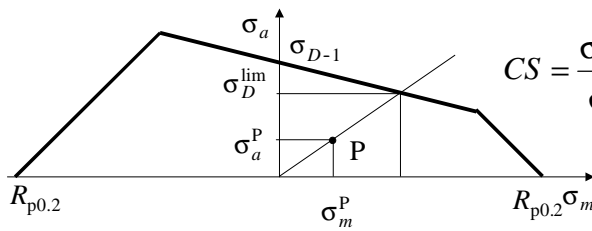


Tensione media costante – tensione alternata dipendente dalle prestazioni



$$CS = \frac{\sigma_D^{\text{lim}}}{\sigma_a^{\text{P}}}$$

Tensione media e alternata dipendenti dalle prestazioni in modo proporzionale

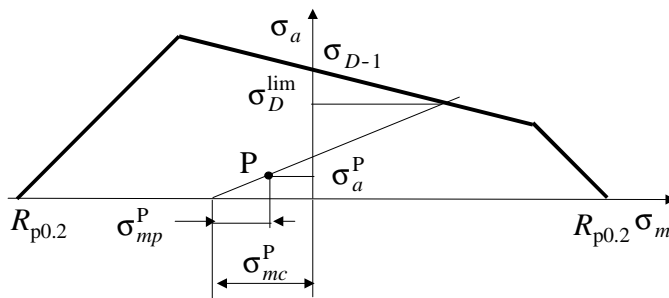


$$CS = \frac{\sigma_D^{\text{lim}}}{\sigma_a^{\text{P}}} = \frac{\sigma_m^{\text{lim}}}{\sigma_m^{\text{P}}} = \frac{\sigma_{\text{max}}^{\text{lim}}}{\sigma_{\text{max}}^{\text{P}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}^{\text{lim}}}{\sigma_{\text{min}}^{\text{P}}}$$

Fatica in σ

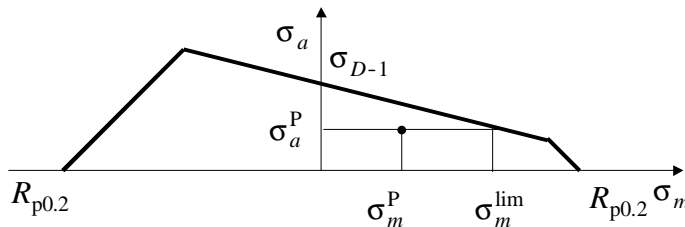
45

Tensione media in parte costante in parte proporzionale alla tensione alternata



$$CS = \frac{\sigma_D^{\text{lim}}}{\sigma_a^{\text{P}}}$$

Tensione alternata costante e tensione media che cambia



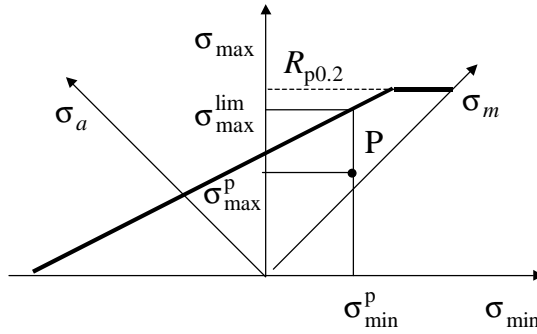
$$CS = \frac{\sigma_m^{\text{lim}}}{\sigma_m^{\text{P}}}$$

Fatica in σ

46

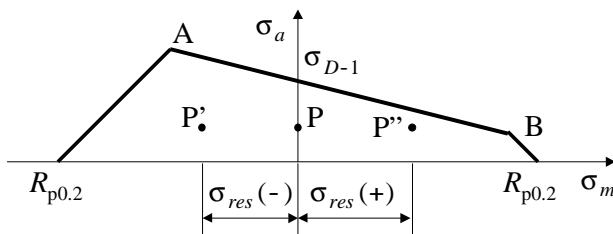


Tensione minima costante e tensione massima che aumenta all'aumentare delle prestazioni richieste



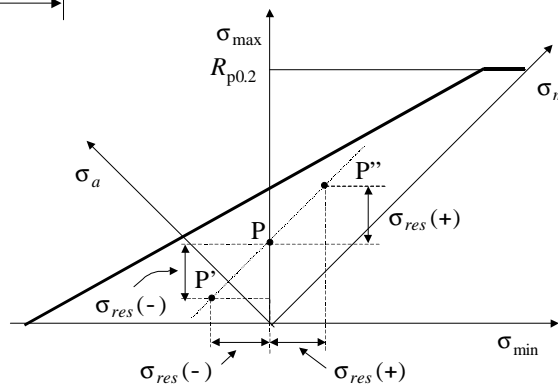
$$CS = \frac{\sigma_{\max}^{\text{lim}}}{\sigma_{\max}^{\text{p}}}$$

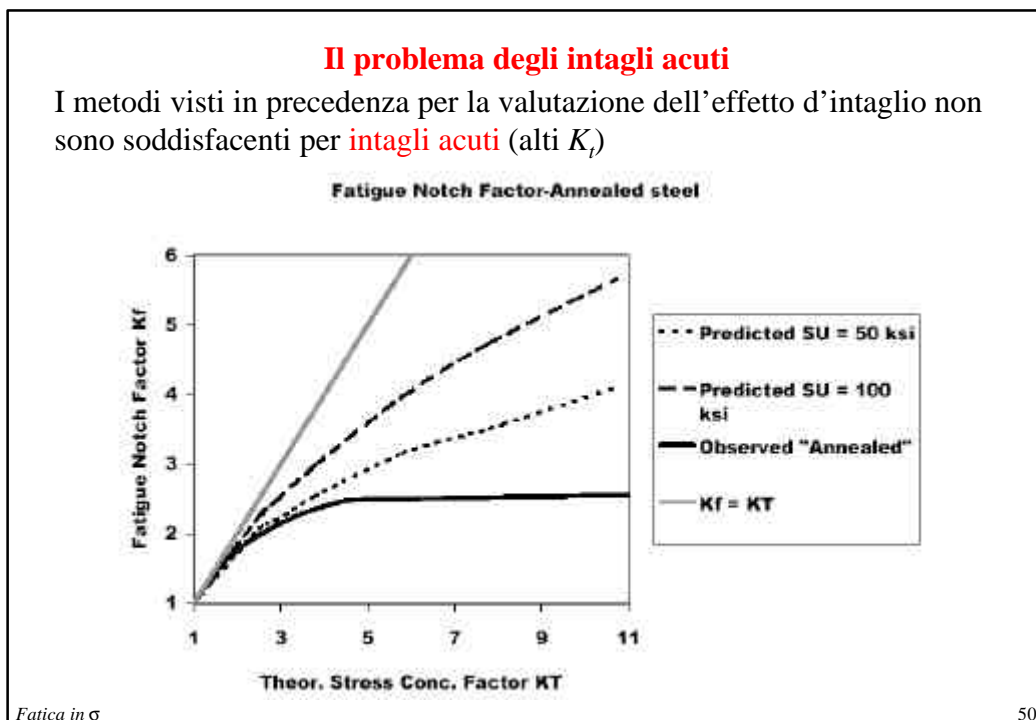
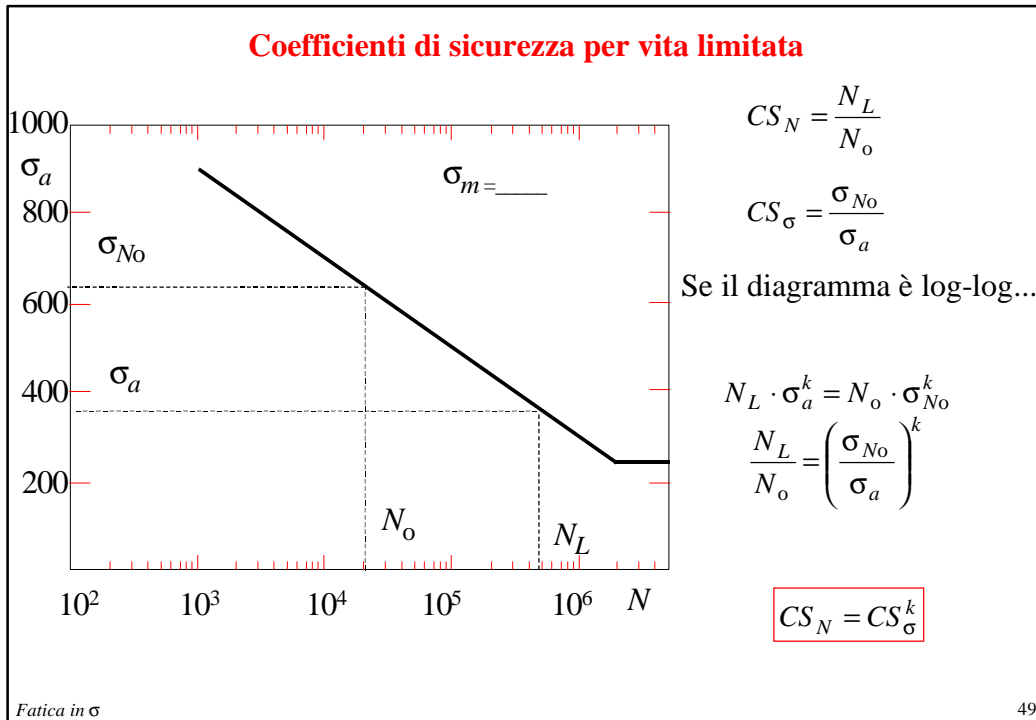
Tensioni residue

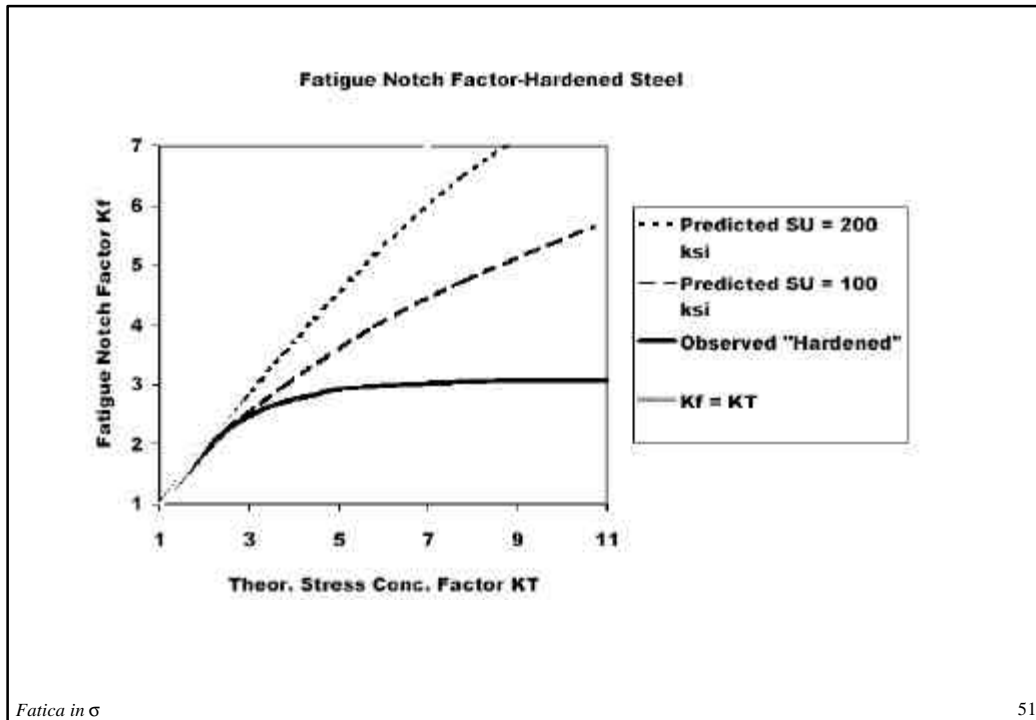


$$\sigma_m = \sigma_m^{\text{carichi}} + \sigma_{\text{res}}$$

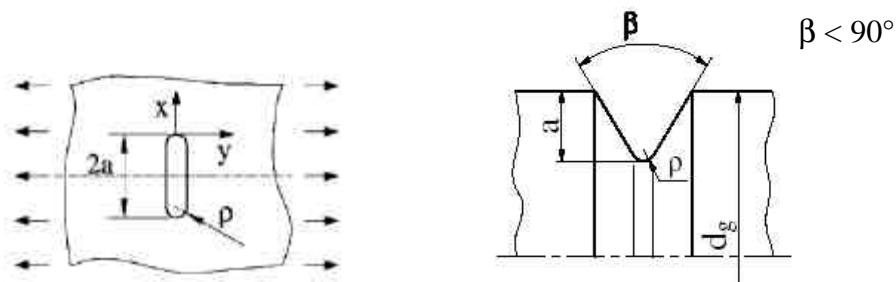
Le tensioni residue possono variare a causa dei carichi applicati







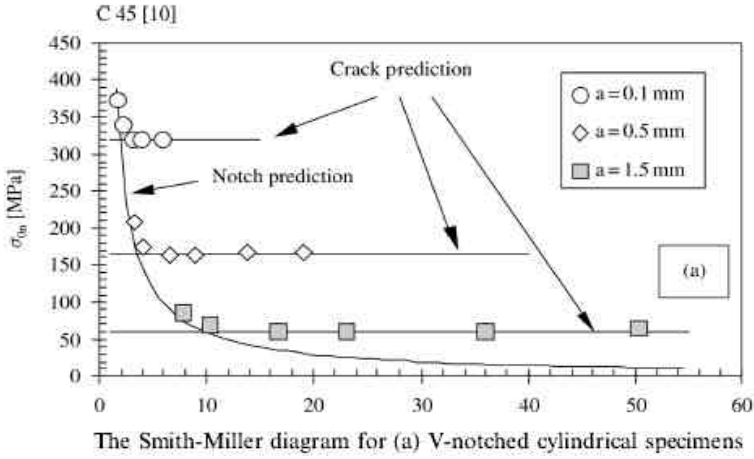
Poiché per gli intagli acuti il fenomeno è dominato dalla propagazione più che dalla nucleazione, abbastanza recentemente si è pensato di trattare questi **intagli** come fossero **cricche** con lunghezza caratteristica **a**



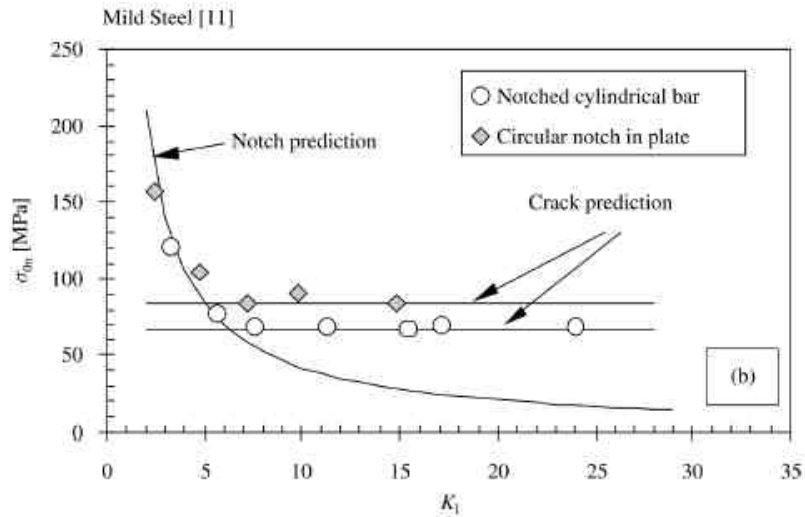
NB: il fattore di concentrazione si calcola basandosi sulle dimensioni dell'area "gross" (K_{tg})



Come si definiscono gli intagli acuti (sharp) ?

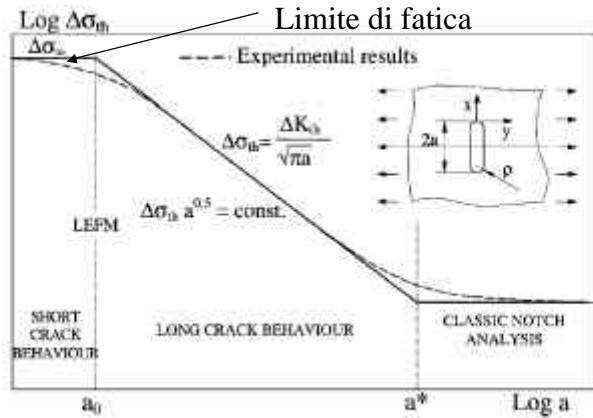


$$\text{Smith - Miller (1978): } K_t^* = \frac{Y\Delta\sigma_0\sqrt{a}}{\Delta K_{th}}$$





Atzori e Lazzarin (2000) hanno proposto di modificare il diagramma di Kitagawa e Takahashi nel seguente modo:



Tensione massima all'apice dell'intaglio in fatica ($q=1$)

$$K_{tg} = \text{cost.}$$

Fig. 5. The Atzori-Lazzarin diagram.

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta K_{th}}{Y \Delta \sigma_{\infty}} \right)^2 = \text{parametro di El Haddad (per } Y = \alpha = 1)$$

Fatica in σ

55

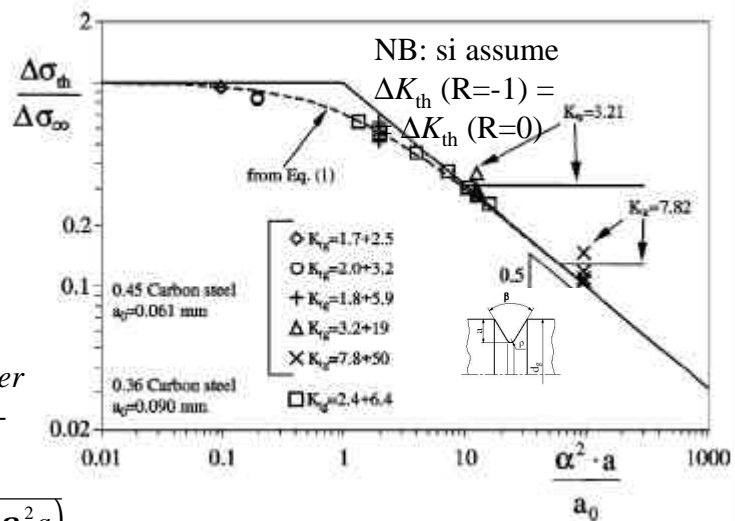
Per intagli non assimilabili a cricche passanti centrali si utilizza una lunghezza equivalente $\alpha^2 a$, dove il fattore di forma α può essere valutato con appositi modelli FEM (se non disponibile in letteratura)

Eq (1) = eq. di Topper modificata da Atzori-Lazzarin:

$$\Delta K_{th} = \Delta s_{th} \sqrt{p(a_0 + \alpha^2 a)}$$

Fatica in σ

Risultati di Atzori e Lazzarin (2003) in flessione rotante
NB: si assume $\Delta K_{th} (R=-1) = \Delta K_{th} (R=0)$



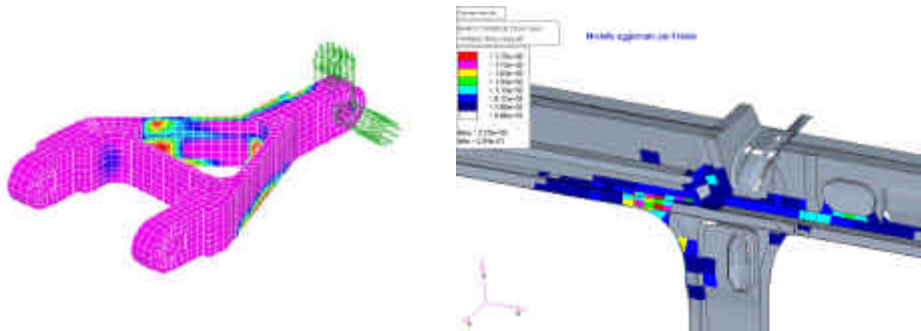
56



Problema: **attualmente il calcolo delle sollecitazioni può avvenire tramite FEM**
Si vorrebbe poter utilizzare i calcoli, in campo lineare elastico per le verifiche a fatica ma:

Difficoltà ad applicare l'approccio classico alla fatica:
Geometria complessa \Rightarrow

- Tensione nominale ?
- K_t o dimensione dell'intaglio ?



Il problema è ancora aperto

Un approccio interessante **CDM : Critical Distance Method (D. Taylor 1997)**

(in realtà il metodo è l'evoluzione dei metodi di Neuber o Peterson etc..)

- Il metodo serve per la verifica al limite di fatica (non per la durata)
- É fondato sull'idea che intagli di diverso tipo possono essere confrontati considerando lo stato di tensione di riferimento:
 - In un punto determinato (point method PM)
 - Sul valor medio lungo un linea (line method LM)
 - Sul valor medio in un'area (area method AM)
 - Sul valor medio in un volume (Volume method VM)

In tutti i casi serve una distanza di riferimento, che deve dipendere solo dal materiale considerato



Per Taylor la distanza critica è funzione del parametro di El Haddad per una cricca centrale passante:

$$L = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma_{\infty}} \right)^2 = a_0$$

per $Y = \alpha = 1$

PM: $CD = L/2$

LM: $CD = 2L$

AM: $CD = 1.32L$

Si considera la
tensione
principale
massima alternata
(modo I)

Material	Reference	R	$\Delta\sigma_0$ (MPa)	ΔK_{th} (MPa m ^{1/2})	L (mm)
AA356-T6	[20]	-1	231	4.4	0.116
C45	[10]	-1	582	8.1	0.061
C36	[10]	-1	450	4.5	0.033
Al 6060-T6	[21]	0.1	109.6	6.1	0.999
		-1	326	12.4	0.458
SM41B	[22]	0	274	8.4	0.296
	[23]	0.4	244	6.4	0.218
Mild steel	[11]	-1	420	12.8	0.296
Al 2024-T351	[24]	-1	248	5.0	0.129
SAE 1045	[24]	-1	608	13.6	0.159
Al Alloy BS L65	[25]	-1	300	4.2	0.062
Steel 15313	[26]	-1	440	12.0	0.237
G40.11	[27]	-1	464	15.9	0.374
AISI 304	[25]	-1	720	12.0	0.088
Ni-Cr steel	[25]	-1	1000	12.8	0.052
EN-GJS-800-8	[28]	0.1	440	8.1	0.108
		-1	155	15.9	3.35
Grey iron	[29]	0.1	99	11.2	4.074
		0.5	68	8.0	4.406
		0.7	48	5.2	3.736

Fatica in σ

59

Commenti:

- Il metodo è sostanzialmente empirico
- Può essere applicato a intagli di ogni tipo (acuti, smussati ,lunghi o corti)
- Taylor ritiene che possa valere anche per le cricche
- Ha dato buoni risultati nel confronto di dati sperimentali (per $R = -1 \div 0.5$) anche nella più semplice e attrattiva versione del PM
- Per Taylor la distanza L è una caratteristica del materiale:
 - Indipendente dalla forma dell'intaglio (o del difetto)
 - Indipendente dal rapporto R

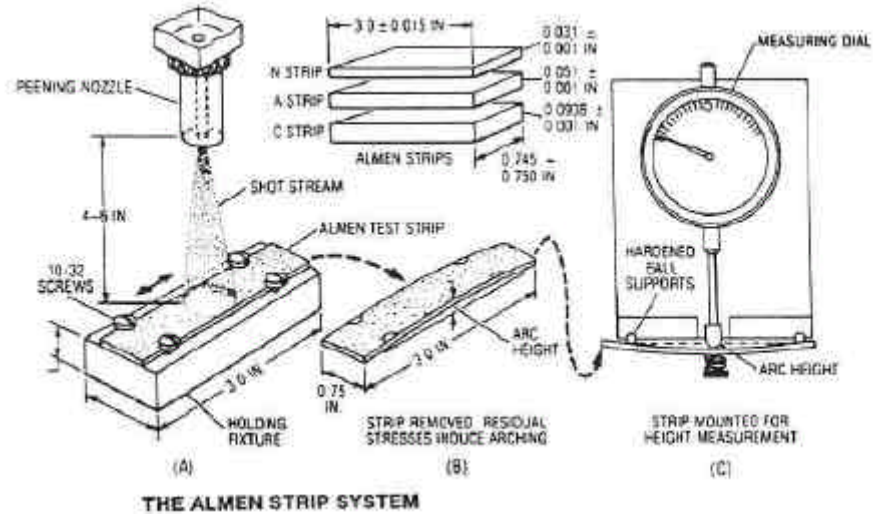
Su questo ultimo punto (indipendenza da R) personalmente nutro seri dubbi; Inoltre penso si possa lavorare per valutare se non si possano applicare metodi della fatica multiassiale

Fatica in σ

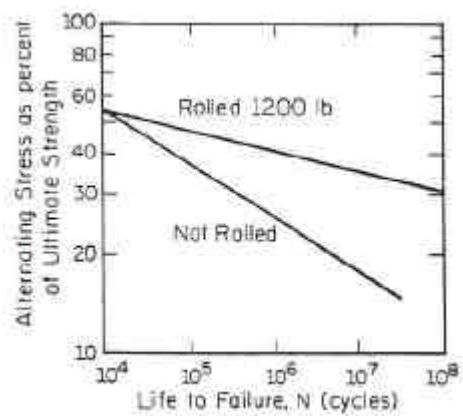
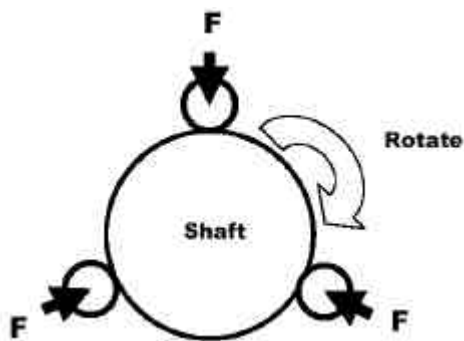
60



Pallinatura



Rullatura a freddo



Se la forza di rullatura è tale da plasticizzare il materiale fino al cuore non si hanno tensioni residue

