

4- Fadiga dos Materiais

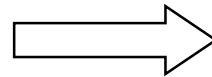
4.1-Introdução

- * Início do século XIX já se conhecia fadiga , mas até hoje o conhecimento não é completo.
- * Wohler , em 1862 , “On the mechanical tests on iron and steel”:

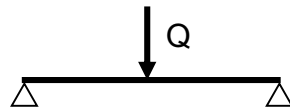
“A tensão com que rompiam em serviço alguns eixos de vagões ferroviários estava bem abaixo da tensão que o eixo suportava estaticamente”

- * Bach , 1908 , separou as solicitações em:

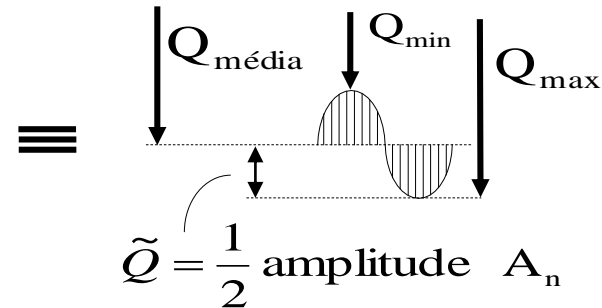
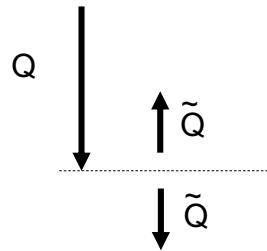
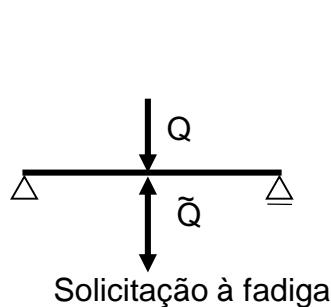
Estáticas
alternada simétrica
flutuante

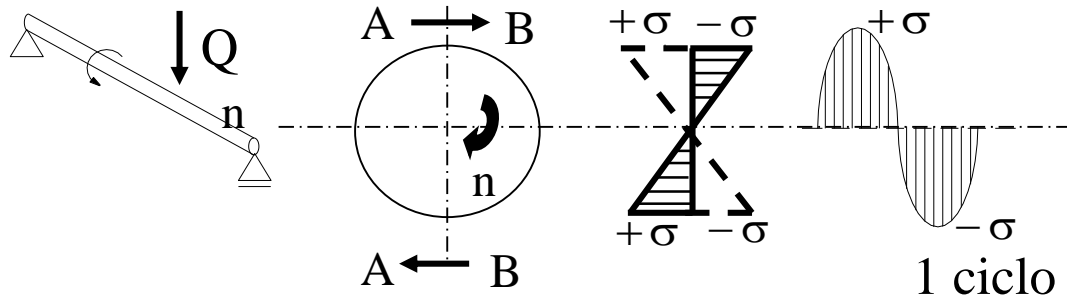


Diferentes coeficientes de segurança



Solicitação estática





Falhas por Fadiga

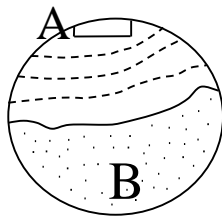
iniciam na superfície ou logo abaixo → trincas microscópicas

Onde?

Pontos de concentração de tensões

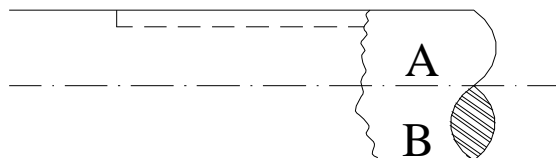
- rasgos de chaveta
- mudança diâmetros
- entalhes
- defeitos superficiais

* Progridem lentamente (A) e falham repentinamente (B)



A- região polida devido ao “abre-fecha”

B- região fosca → ruptura violenta

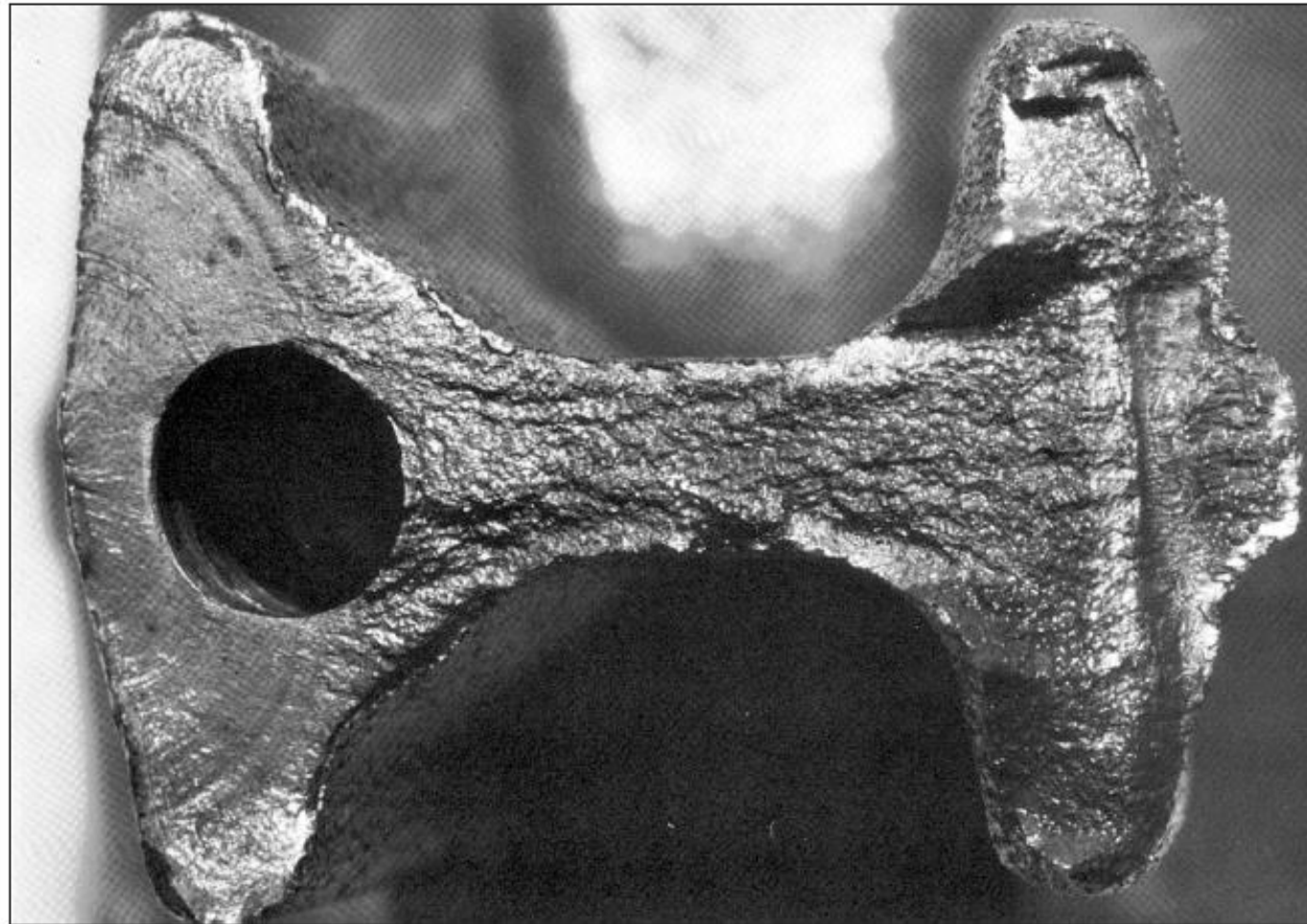


rasgo de chaveta
concentração de tensões

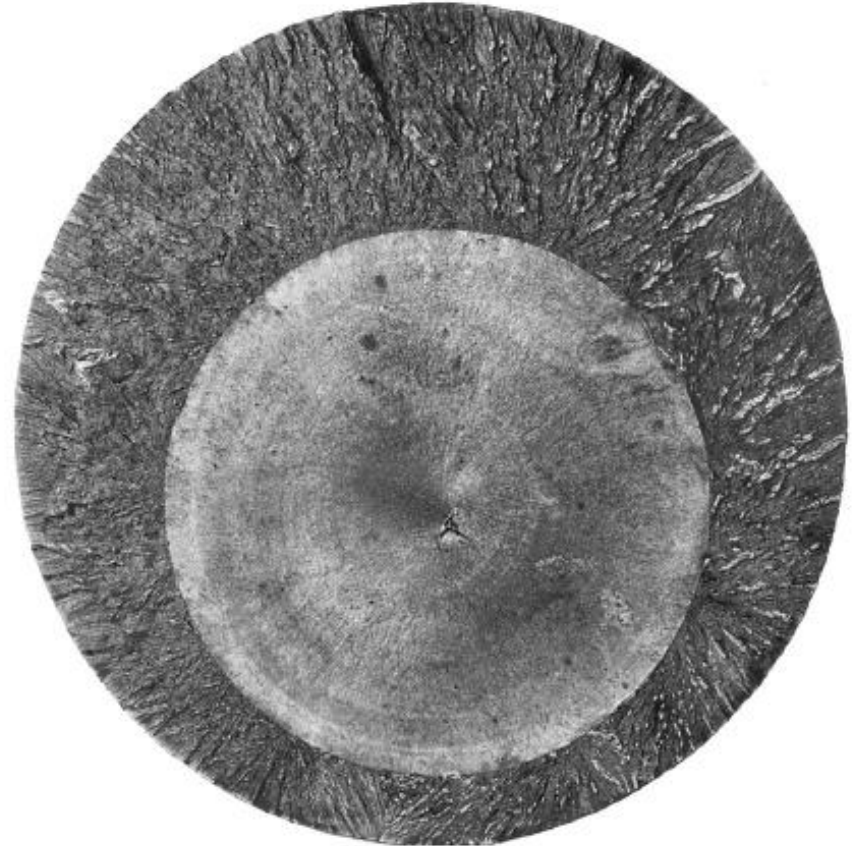
Fatigue fracture of an AISI 4320 drive shaft. The fatigue failure initiated at the end of the keyway at points *B* and progressed to final rupture at *C*. The final rupture zone is small, indicating that loads were low. (From *ASM Handbook, Vol. 12: Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 51, p. 120. Reprinted by permission of ASM International®, www.asminternational.org.*)



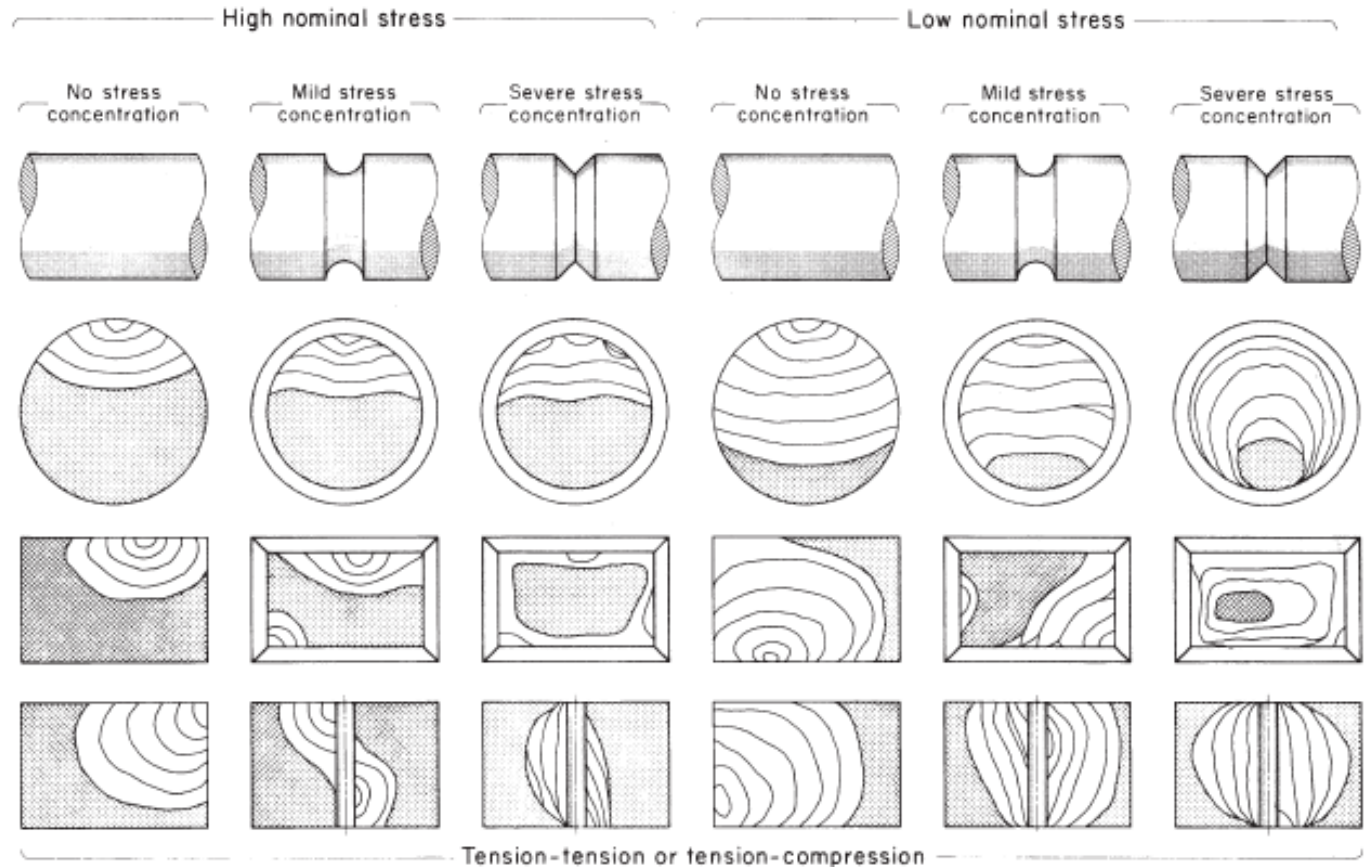
Fatigue fracture surface of a forged connecting rod of AISI 8640 steel. The fatigue crack origin is at the left edge, at the flash line of the forging, but no unusual roughness of the flash trim was indicated. The fatigue crack progressed halfway around the oil hole at the left, indicated by the beach marks, before final fast fracture occurred. Note the pronounced shear lip in the final fracture at the right edge. (From ASM Handbook, Vol. 12: Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 523, p. 332. Reprinted by permission of ASM International®, www.asminternational.org.)

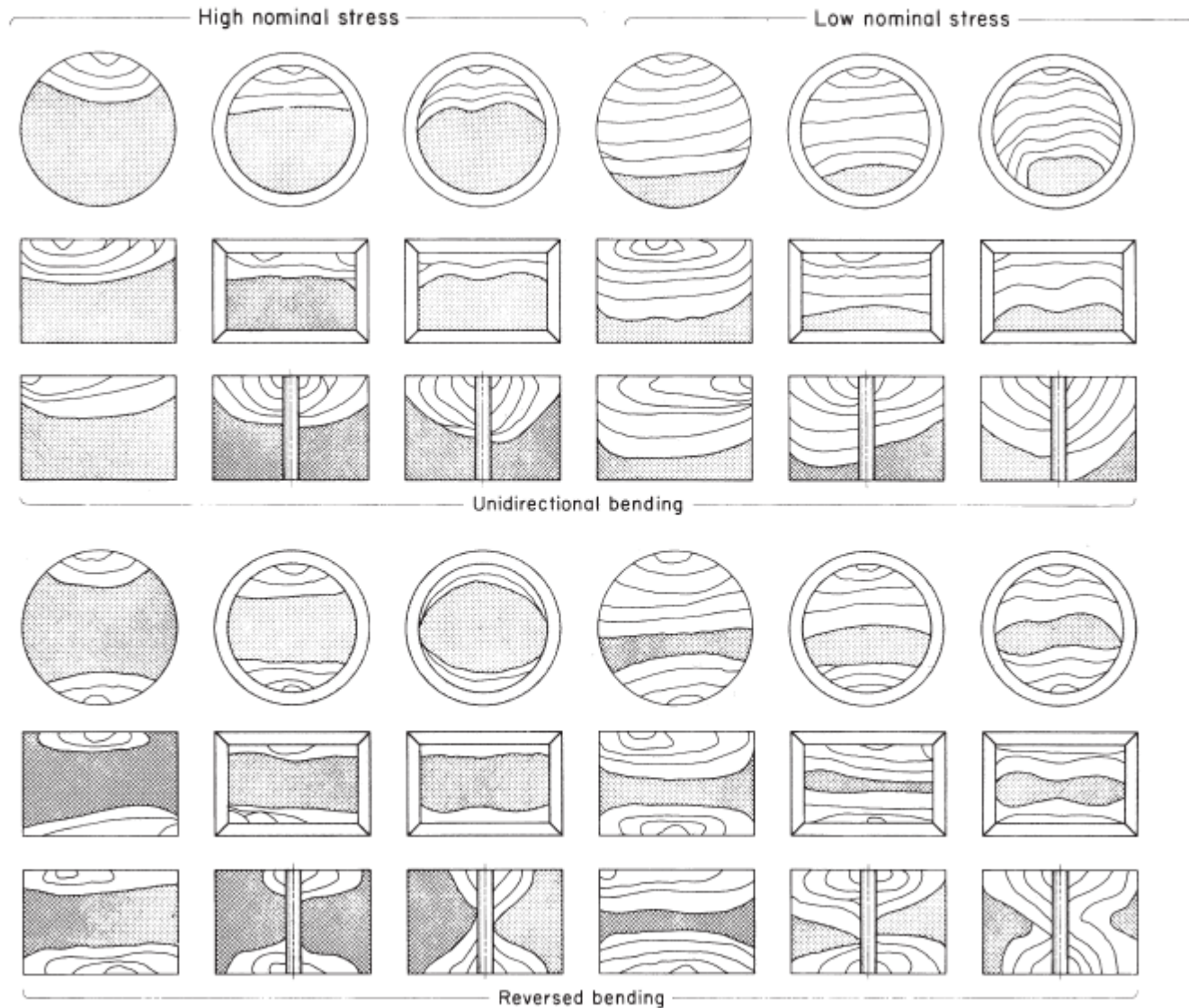


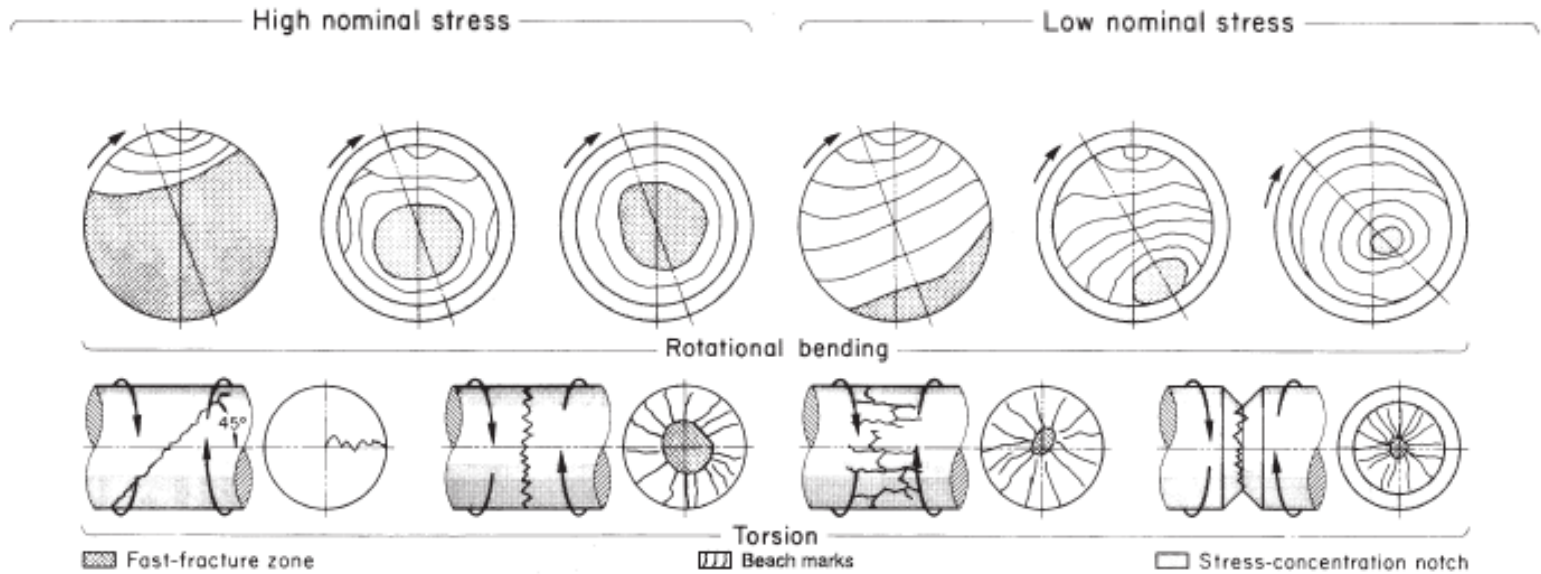
Fatigue fracture surface of a 200-mm (8-in) diameter piston rod of an alloy steel steam hammer used for forging. This is an example of a fatigue fracture caused by pure tension where surface stress concentrations are absent and a crack may initiate anywhere in the cross section. In this instance, the initial crack formed at a forging flake slightly below center, grew outward symmetrically, and ultimately produced a brittle fracture without warning. (From *ASM Handbook, Vol. 12: Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 570, p. 342. Reprinted by permission of ASM International®*, www.asminternational.org.)



Schematics of fatigue fracture surfaces produced in smooth and notched components with round and rectangular cross sections under various loading conditions and nominal stress levels. (From *ASM Metals Handbook, Vol. 11: Failure Analysis and Prevention, 1986, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 18, p. 111. Reprinted by permission of ASM International®, www.asminternational.org.*)





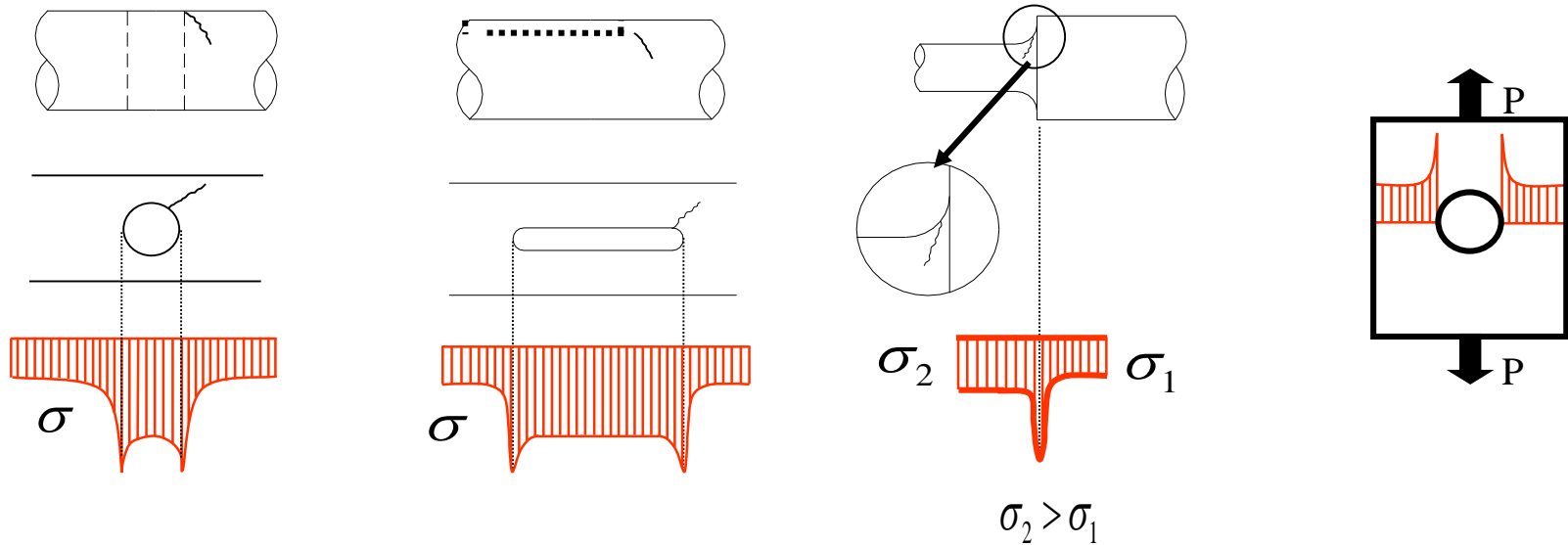


Fatores que contribuem para fadiga

- Grande diferença entre σ_{\min} e σ_{\max}
- Grande número de ciclos
- σ_{\max} muito elevado
- Tipo de material (aço, alumínio, plástico, etc.)

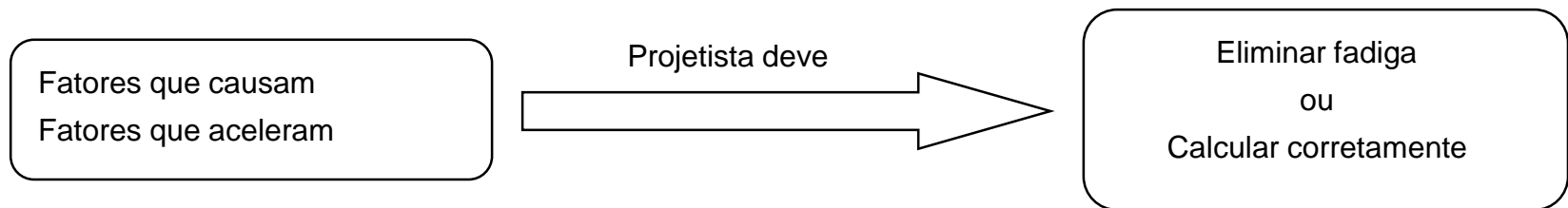
Fatores que aceleram a fadiga

a) Concentração de tensões (entalhes)



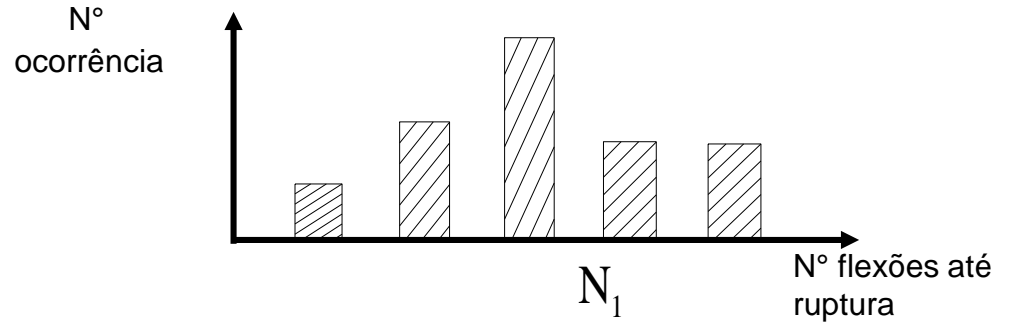
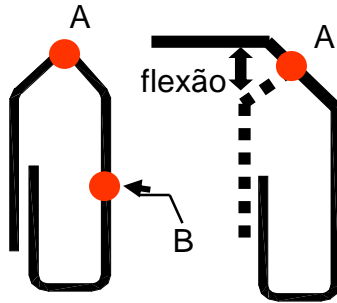
- b) Imprecisões metalúrgicas (composição, dureza, ...)
- c) Acabamento superficial
- d) Corrosão
- e) Tensões residuais
- f) Temperatura (somente se alterar propriedades mecânicas)
- g) Sobrecarga

OBS.: Frequência (tempo do ciclo) NÃO tem influência



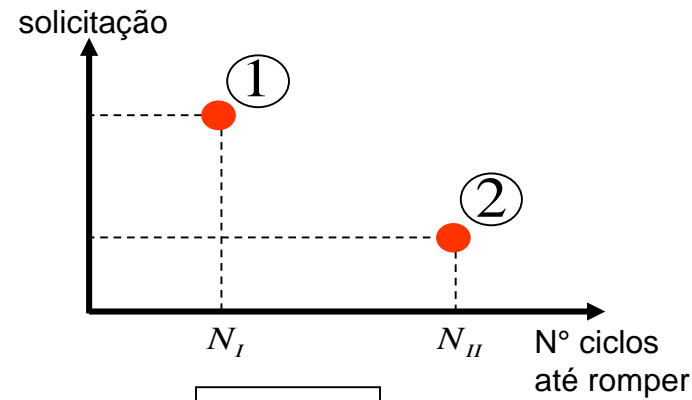
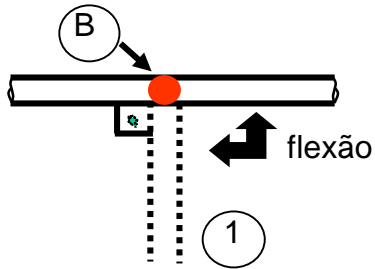
4.2 - Diagrama de Wohler ou S-N

Experiência I



fenômeno estatístico!

Experiência II



Experiência III

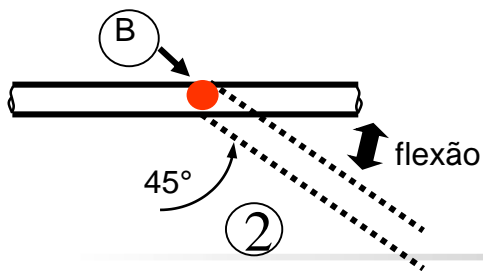
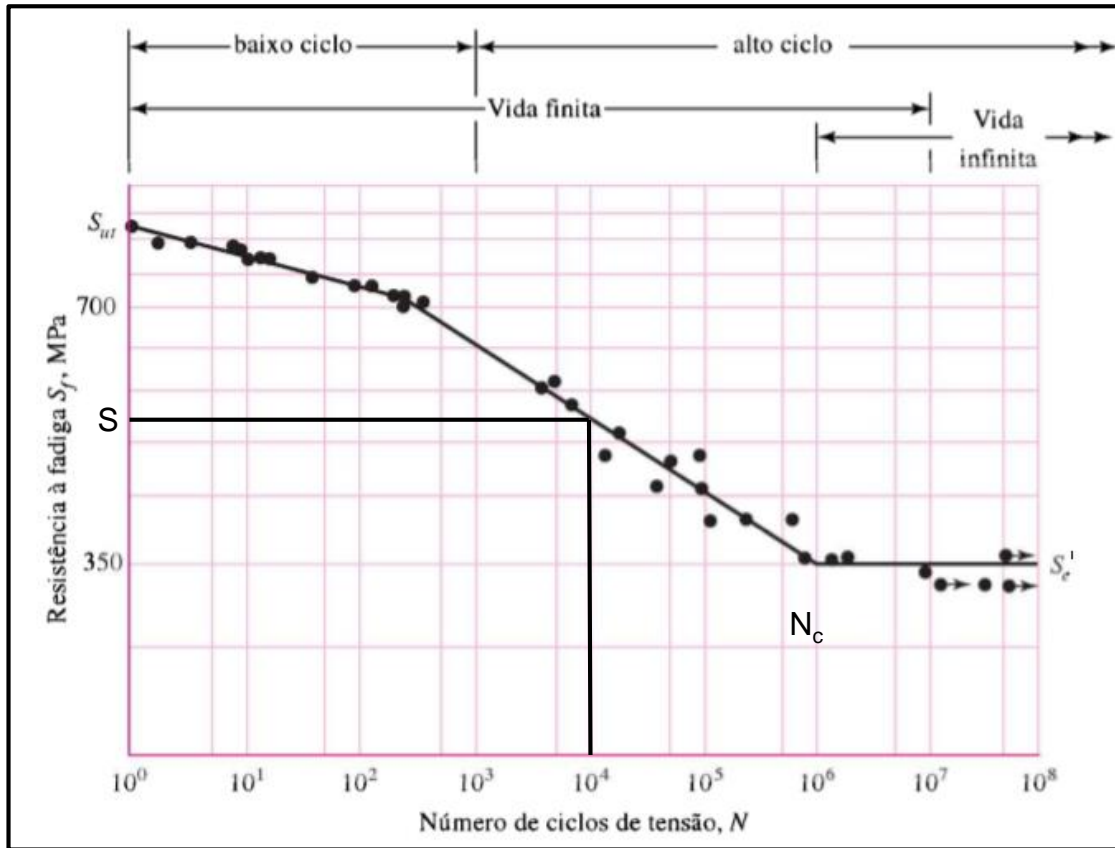


Diagrama de Wohler S-N



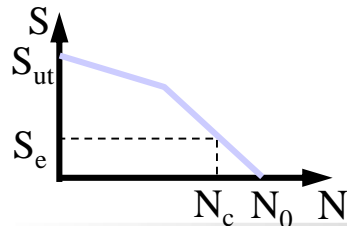
S_{ut} - tensão ruptura estática

S'_e - tensão limite de resistência à fadiga

$$S'_e \cong 0,4 \text{ a } 0,6 S_{ut}$$

$\sigma \leq S'_e$: vida infinita

N_c - n° crítico de ciclos



- Al e ligas
- Cu e ligas
- Mg
- plásticos

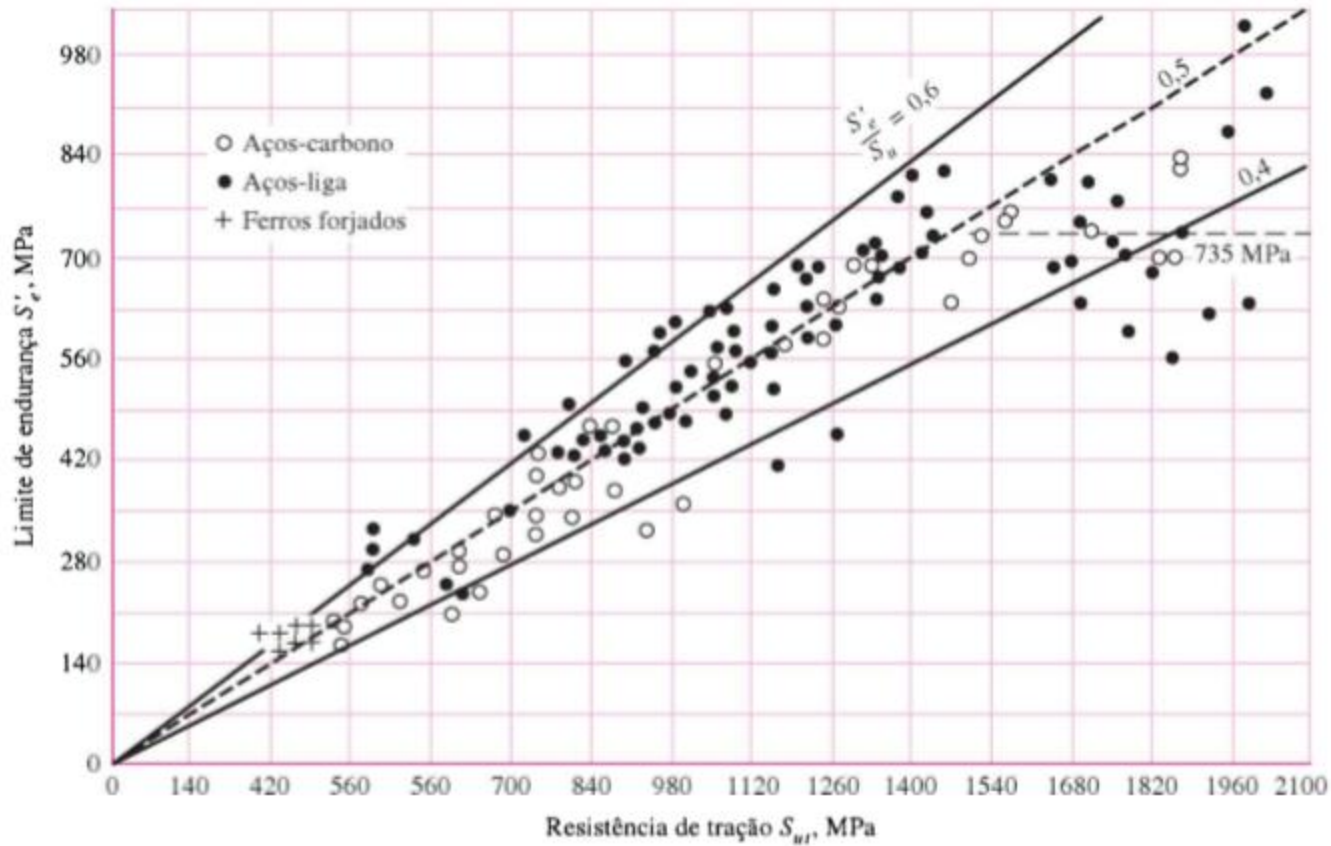
$$S'_e \cong 0,3 \text{ a } 0,4 S_{ut}$$

$$S'_e \cong 0,18 \text{ a } 0,3 S_{ut}$$

não há vida infinita !!

$$N_0 \geq 10^9$$

$$S'_e \iff 10^8 \text{ (por convenção)}$$



Um eixo girando com $n=1000$ [rpm], faz $60 \times n$ [ciclos/hora], para $N_c = 10^7$ ciclos e tensão S'_e :

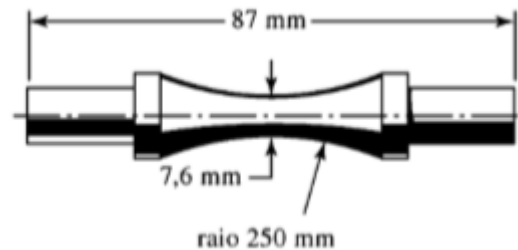
atinge N_c em $\frac{1 \times 10^7}{60 \times 1000} \cong 166,6$ horas de serviço.

se trabalhar com tensão S romperá com 10^4 ciclos (diagrama) em $\frac{10^4}{60 \times 1000} = 10$ minutos

- $N < 10^3$ - construção civil . Solicitação estática.
- $10^3 < N < N_c$ - peças de engenharia mecânica com vida curta (descartáveis, ausência calculada , baixa frequência de uso , etc).
- $N > N_c$ - peças mecânicas em geral

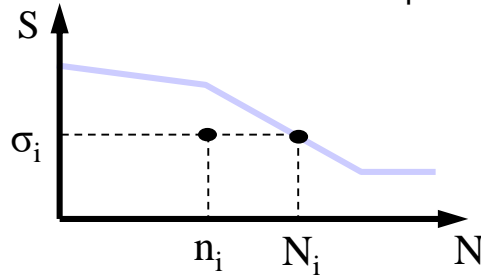
Importante

Curva de Wohler pode ser obtida com corpo de prova padrão ou com a própria peça.



Danos Acumulativos

Não existe teoria exata a respeito.



- n_i - nº de ciclos sob tensão σ_i
- N_i - nº de ciclos para romper sob apenas σ_i

Depois de (σ_i, n_i) não rompe mas causa danos que diminuem a vida. Agora S_e é menor que originalmente.

Teoria de Miner

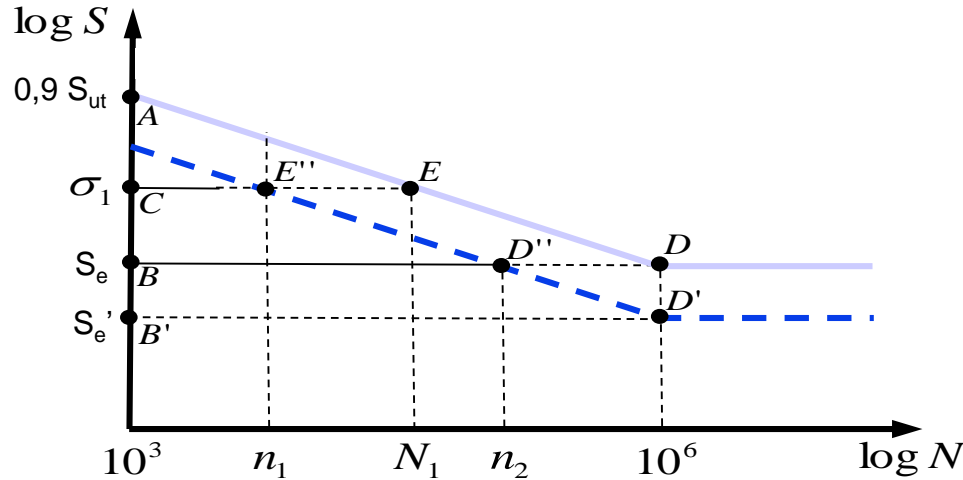
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = C \quad 0.7 \leq C \leq 2.2$$

Assume-se $C=1$ e trecho entre $[10^3, 0.9 S_{ut}]$ e $[N_c, S_e]$ do diagrama S-N original.

Exemplo :

$$\sigma_{ut} = 55 \text{ [Kgf/mm}^2\text{]}; S_e = 27,6 \text{ [Kgf/mm}^2\text{]}; N_c = 10^6$$

Se a peça for submetida a $\sigma_1 = 41,3 \text{ [Kgf/mm}^2\text{]}$ por $n_1 = 3000$ [ciclos], qual o novo limite da fadiga?



Usa-se o diagrama de Wohler “original” AED e por semelhança $\triangle ACE$ e $\triangle ABD$, lembrando que o espaço é log x log

$$\frac{\log N_1 - \log 10^3}{\log(0,9S_{ut}) - \log \sigma_1} = \frac{\log 10^6 - \log 10^3}{\log(0,9S_{ut}) - \log S_e} \rightarrow \log N_1 = 3,93$$

$$N_1 = 8,51 \times 10^3 \text{ [ciclos]}$$

Se trabalharmos com σ_1 , até o fim da vida ainda restam :

$$\Delta = N_1 - n_1 = 5510 \text{ [ciclos].}$$

Se trabalharmos com $\sigma = S_e$ teremos n_2 ciclos restantes, segundo a teoria de Miner

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \Rightarrow n_2 = \left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right) N_2$$

$$n_2 = \left[1 - \frac{3 \times 10^3}{8,51 \times 10^3}\right] \times 10^6 = 0,65 \times 10^6 [\text{ciclos}]$$

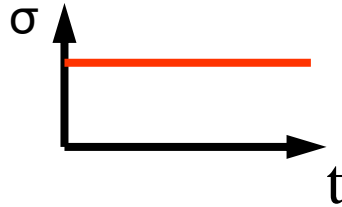
Ainda segundo Miner, a reta AED // D'D"E" no espaço log x log e $\Delta DD'D''$ é semelhante a ΔABD

$$\frac{\log 10^6 - \log 0,65 \times 10^6}{\log S_e - \log S_e'} = \frac{\log 10^6 - \log 10^3}{\log(0,9S_{ut}) - \log S_e}$$

$$\log S_e' = 1,424881 \rightarrow S_e' = 26,6 \text{ kgf/mm}^2$$

4.3-Tipos de variações de tensões

Contínua

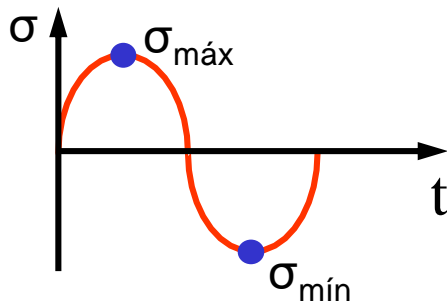


$$\sigma_{\text{máx}} = \sigma_{\text{mín}} = \sigma_m$$

Tensão genérica, pode ser

- | | |
|---|-----------------------------|
| { | $\sigma > 0$ tração |
| | $\sigma < 0$ compressão |
| | τ cisalhamento |
| | flexão $\rightarrow \sigma$ |

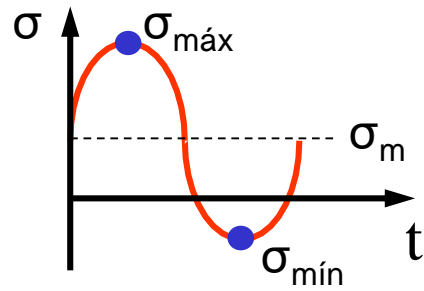
Alternada simétrica



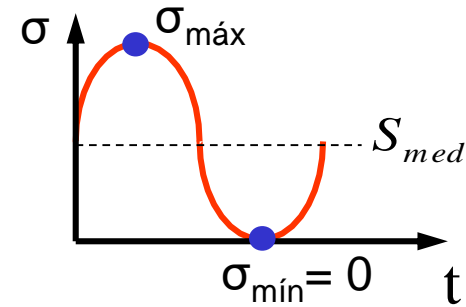
$$|\sigma_{\text{máx}}| = |\sigma_{\text{mín}}|$$

$$\sigma_m = 0$$

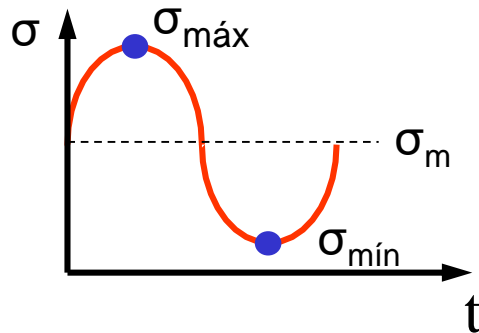
Alternada



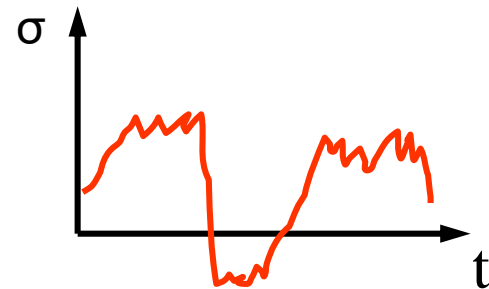
Pulsatória



Pulsatória ondulada



Aleatória

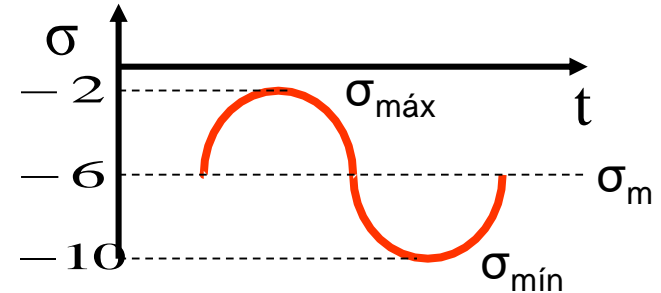


Parâmetros que definem a Variação de Tensão

1) Amplitude

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$$\sigma_r = -2 - (-10) = 8$$



2) Tensão média

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{max} + \sigma_{min})$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (-2 + (-10)) = -6$$

3) Coeficiente de variação de solitação k

$$k = \frac{\sigma_M}{|\sigma_m|}$$

$$k = \frac{\max(|-2|, |-10|)}{|-6|} = \frac{10}{6}$$

$$\sigma_M = \max(|\sigma_{max}|, |\sigma_{min}|)$$

4) Tensão alternante

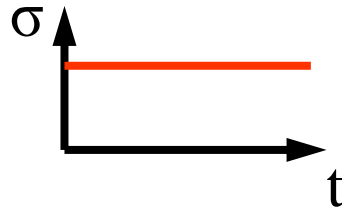
$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right|$$

4) Tensão estática

σ_s Devido à pré carga INDEPENDENTE de σ_m

Aplicações aos casos anteriores:

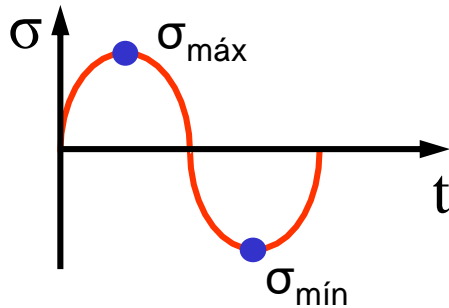
Contínua



$$\sigma_{\text{máx}} = \sigma_{\text{mín}} = \sigma_m$$

$$k = \frac{\sigma_M}{|\sigma_m|} \quad k = 1$$

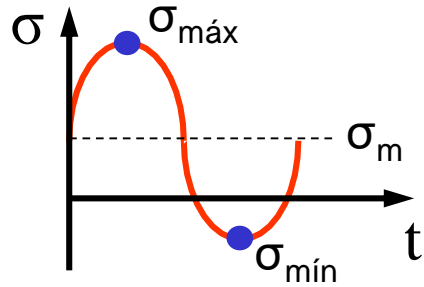
Alternada simétrica



$$|\sigma_{\text{máx}}| = |\sigma_{\text{mín}}| \quad \sigma_m = 0$$

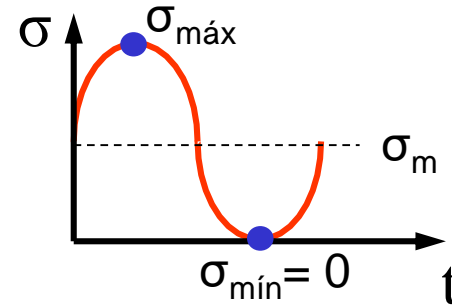
$$k = \frac{\sigma_M}{|\sigma_m|} \quad k = \infty$$

Alternada



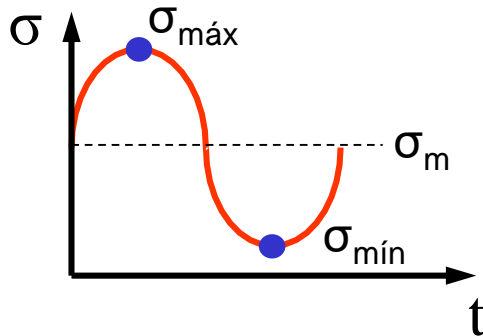
$$k = \frac{\sigma_M}{|\sigma_m|} \quad 2 < k < \infty$$

Pulsatória



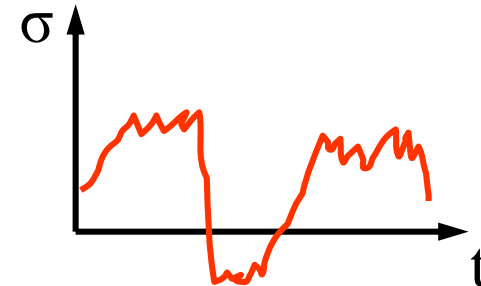
$$k = 2$$






Pulsatória ondulada

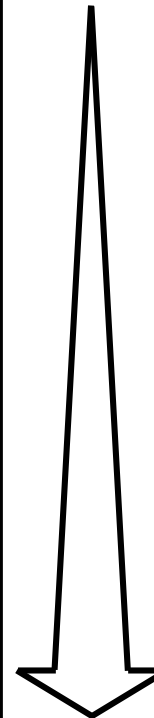


$$1 < k < 2$$

Aleatória

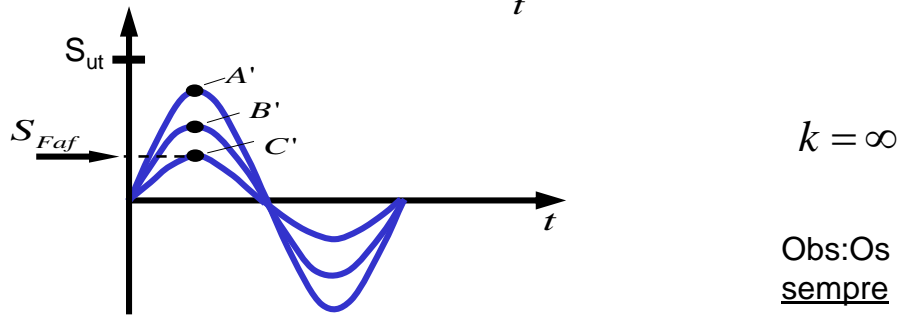
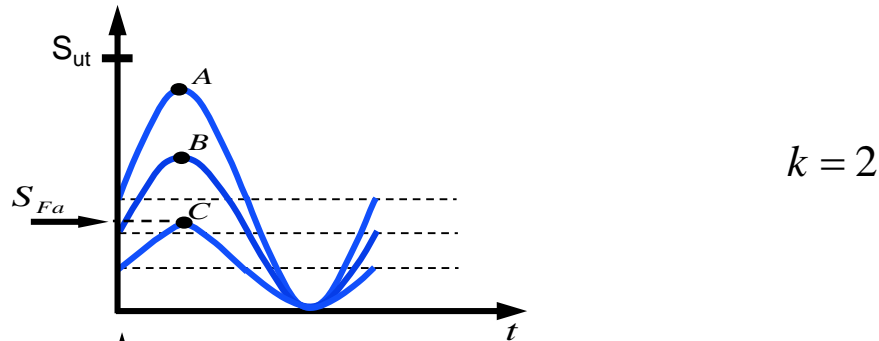
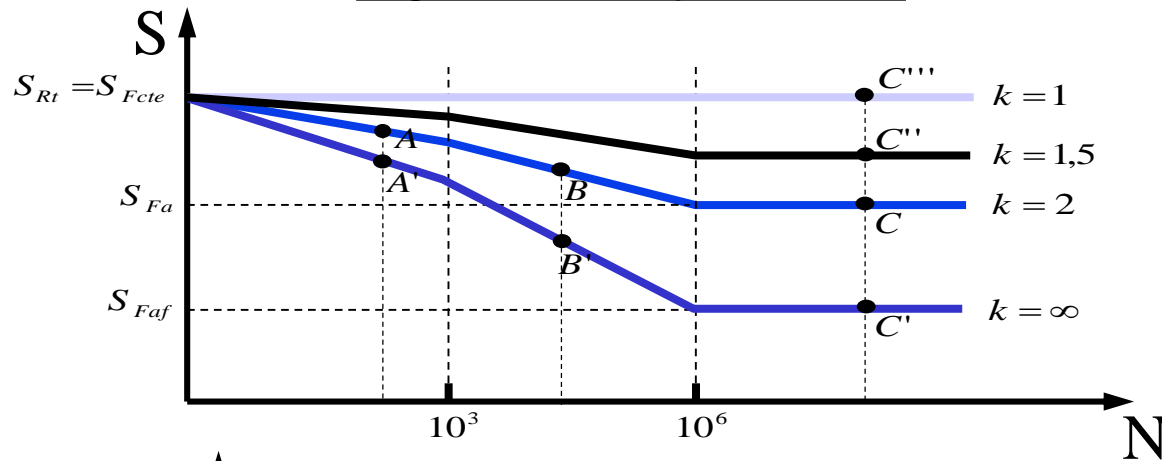


Tipo de solicitação	Gráfico	k
Contínua		1
Pulsatória ondulada		$1 < k < 2$
Pulsatória		2
Alternada		$2 < k < \infty$
Alternada simétrica		∞



Severidade de solicitação à fadiga

Diagrama de Wohler para vários k's



Obs: Os valores de S usados nas ordenadas são sempre : $S_M = \max(|S_{max}|, |S_{min}|)$

Para cada k



S_{Fk} tensão limite de fadiga

Explicação das Experiências

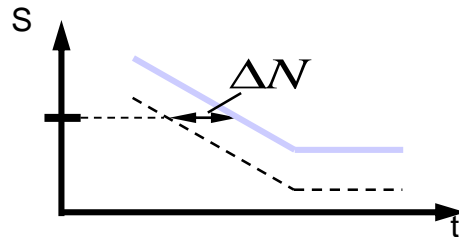


Exp I

O ponto A tem forte deformação plástica

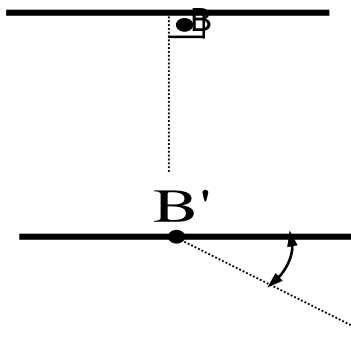


equivalente dano cumulativo.

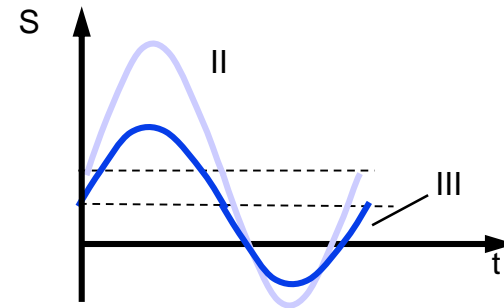
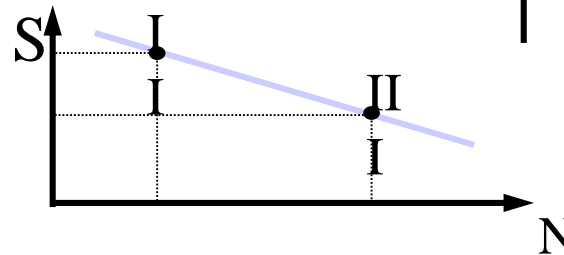


N_i menor que na experiência II

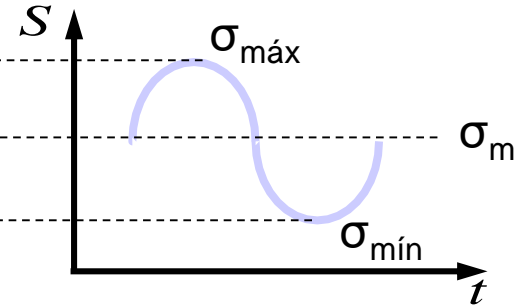
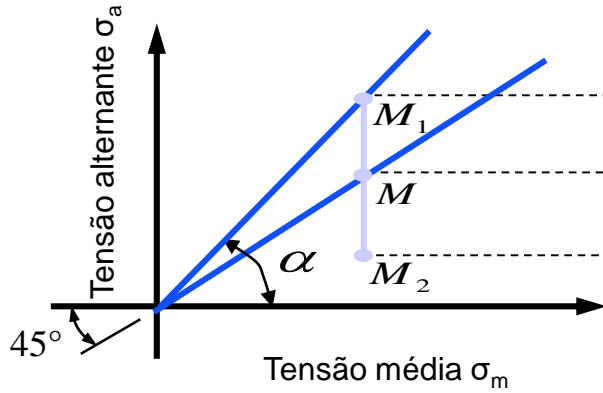
Experiências II e III



45°

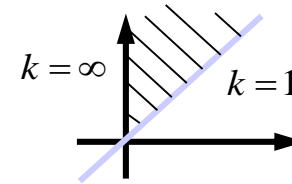


4.4- Diagrama de Smith



*lugar geométrico dos M → reta 45°

$$\tan \alpha = \frac{\sigma_M}{\sigma_m} = k$$



$$45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

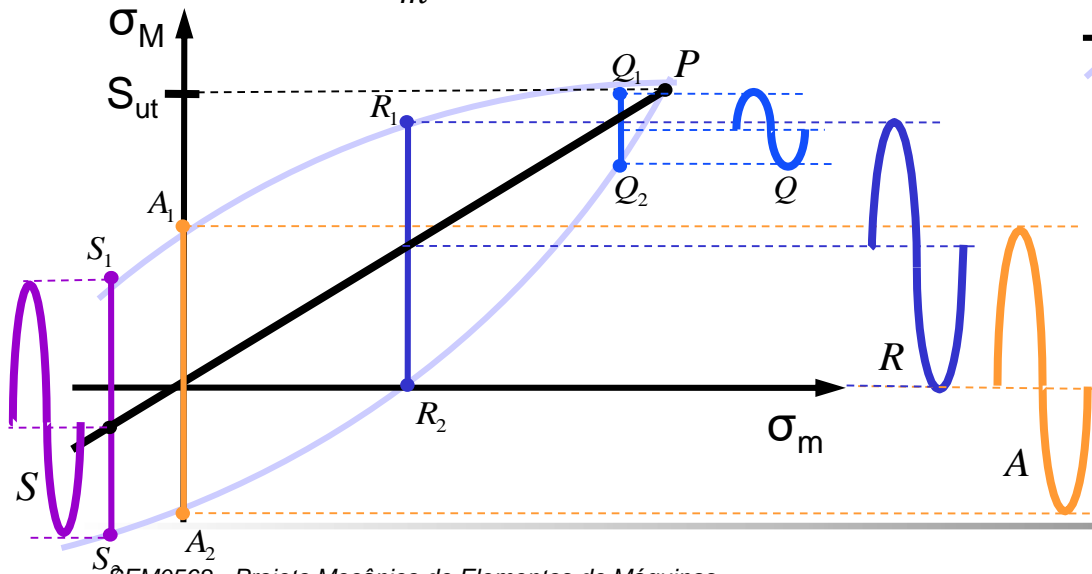
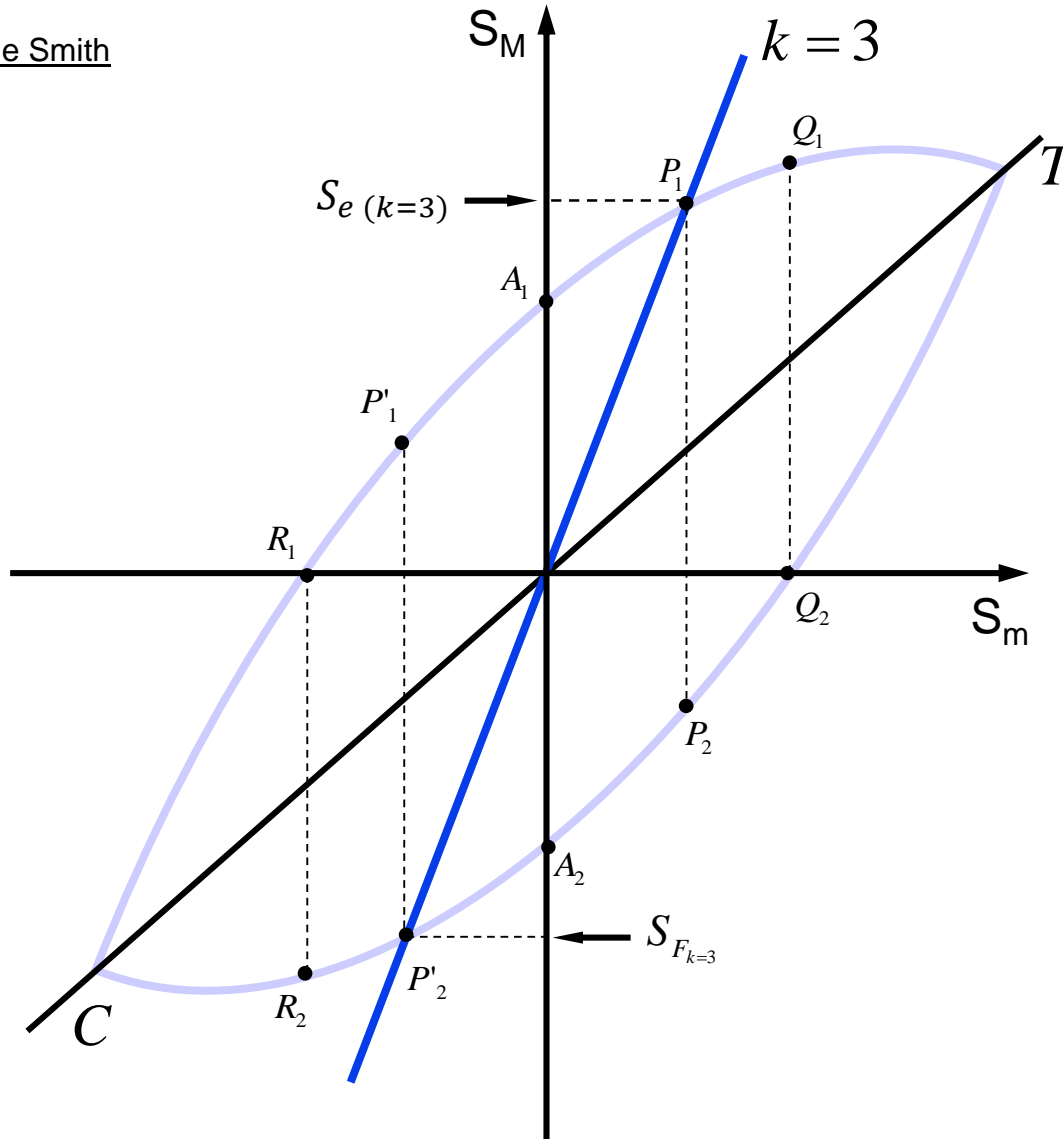


Diagrama de Smith



Observações sobre o Diagrama de Smith

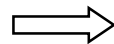
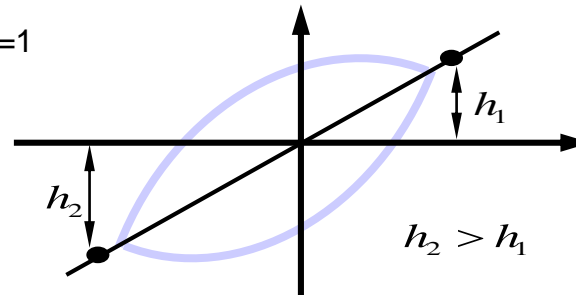
- Trecho CA_1T tensões máximas
- Trecho CA_2T tensões mínimas
- Ramos A_1T e CA_2 contém pontos $S_M = \max(|S_{\max}|, |S_{\min}|)$ daí saem S_F para os vários k 's.
- Ramos Q_2T e R_1T representam “tração”, $S > 0$
- Ramos R_1C e Q_2C representam “compressão”, $S < 0$
- 1°Q e 4°Q predomina $S > 0$
- 2°Q e 3°Q predomina $S < 0$

Pontos Notáveis

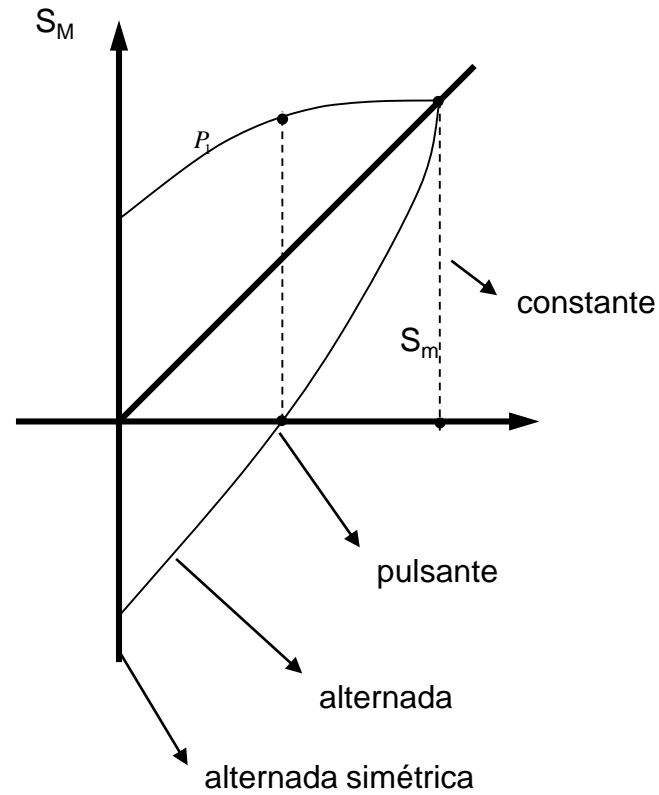
- T - S_{ut} - tensão ruptura à tração, $k=1$
- C - S_{uc} - tensão ruptura à compressão, $k=1$

Faz-se : $S_u = S_c$

Mas na realidade

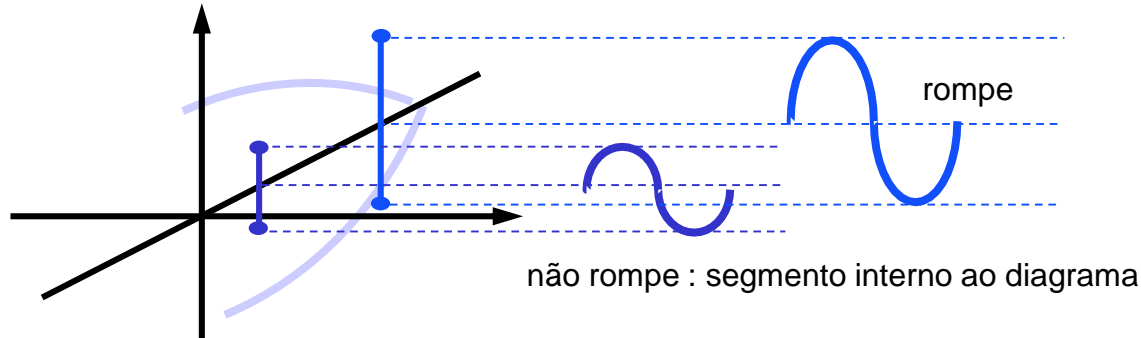


$$k = \infty$$

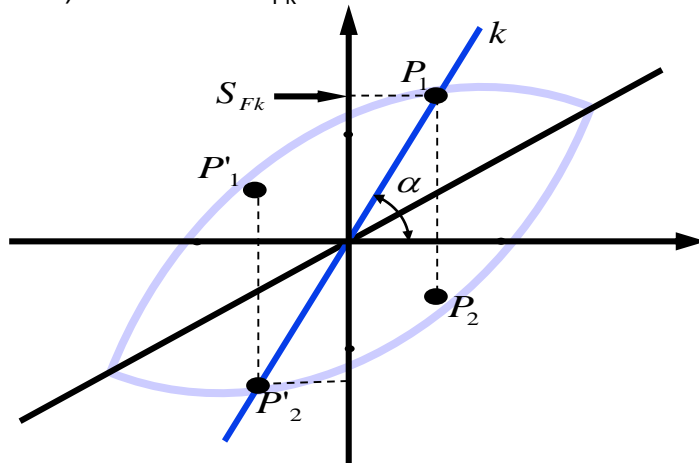


Uso do Diagrama de Smith

1) Saber se com certa sollicitação o corpo de prova rompe ou não à fadiga



2) Determinar S_{Fk}



Fazendo a reta passar pela origem com :

$$\alpha = \text{arc tg } k$$

Determina-se S_{Fk}

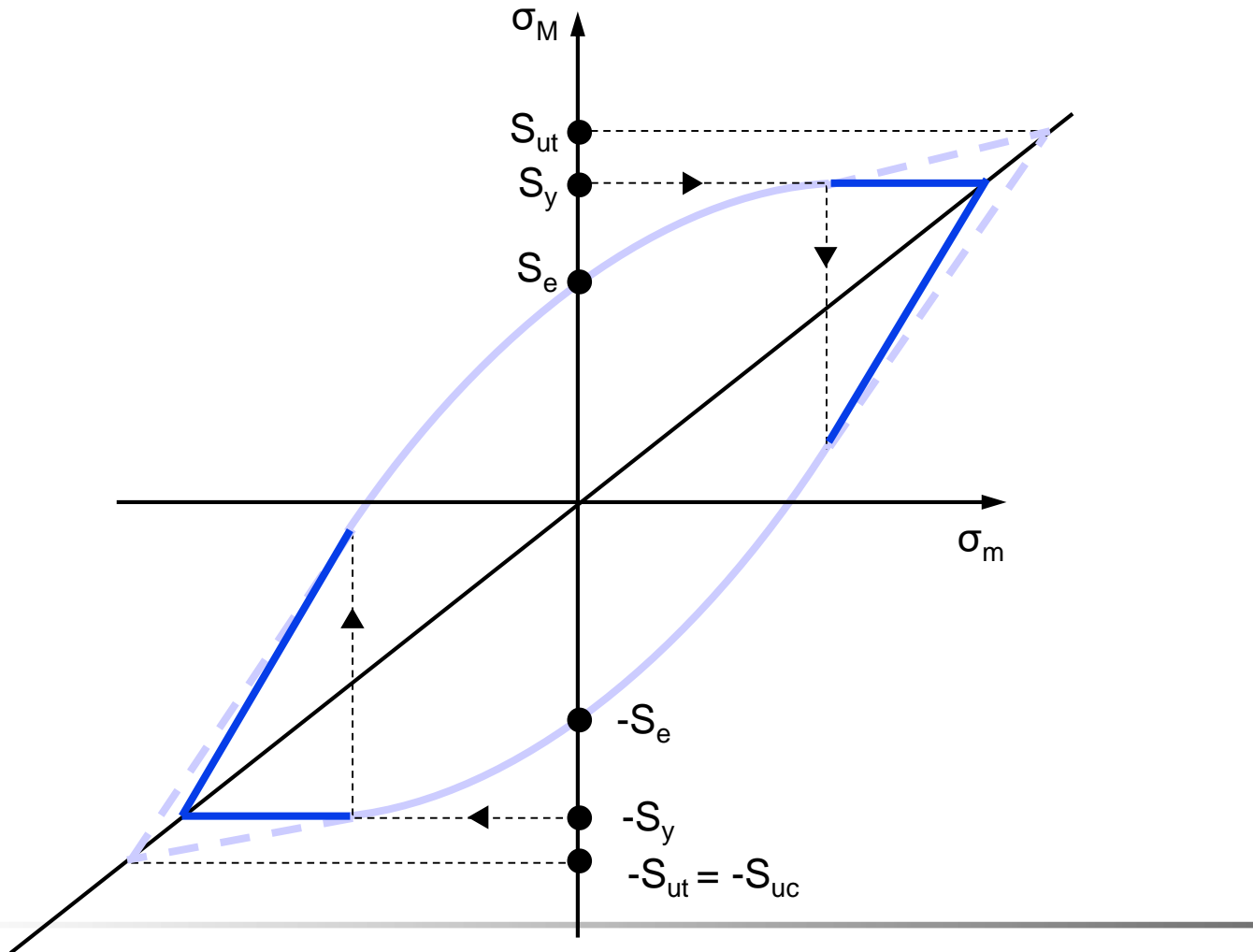
S_{Fk} é P_1

porque

$$|P_1| > |P_2|$$

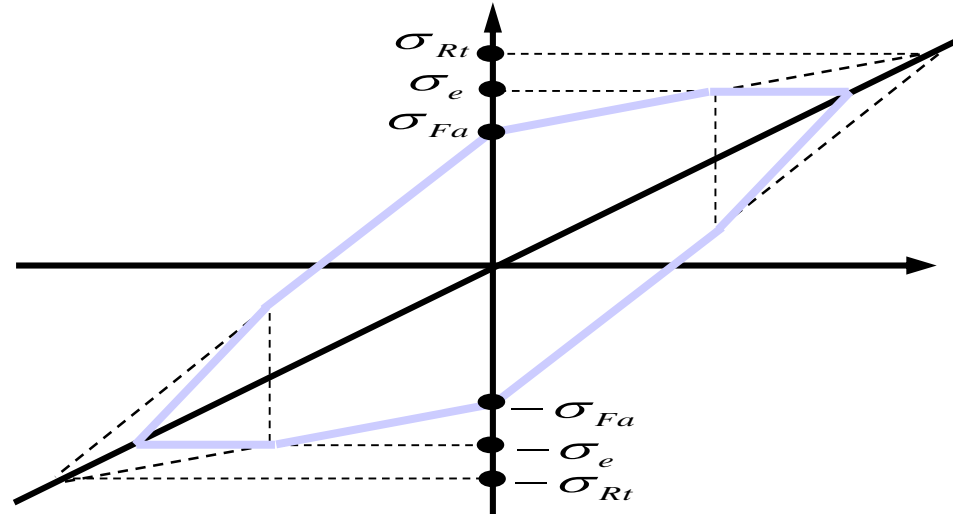
Limitação do Diagrama de Smith

- Normalmente deve-se evitar deformações permanentes



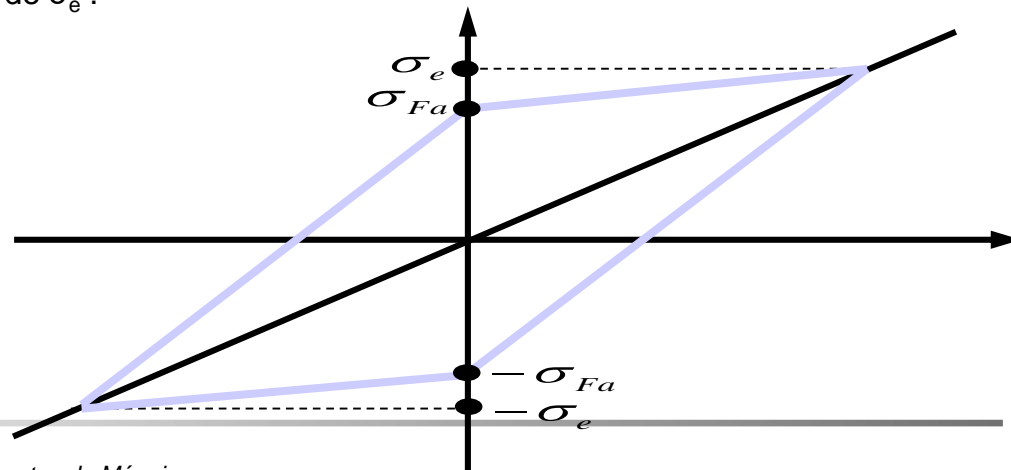
4.5- Diagrama de Smith Simplificado - Diagrama de Goodman

Quando se conhecem σ_{rt} , σ_e , σ_{Fa}

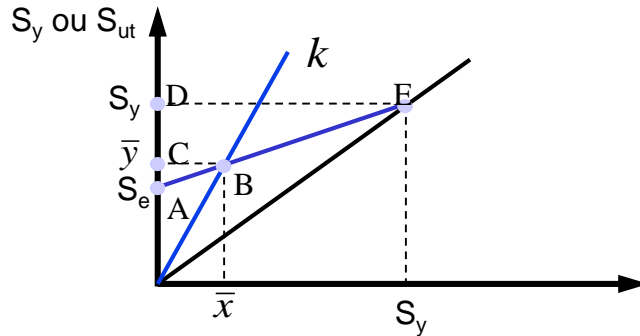


- Quando não se leva em conta σ_{rt} . Basta conhecer σ_e e σ_{Faf} (S_e e S_{Faf})
- Para solicitação uniaxial usar (S_e e S_{Faa}), para torção (S_e e S_{Fat}), etc.
- Para materiais frágeis usar σ_{rt} em vez de σ_e .

Quando não se conhece σ_{rt}



Expressão Analítica de S_{Fk} $k \neq \infty$



Reta representativa de $k \neq \infty \implies y = k \cdot x$

Semelhança de triângulos: $\triangle ABC \sim \triangle AED \implies \frac{\bar{y} - S_e}{\bar{x}} = \frac{S_y - S_e}{S_y}$

$$\bar{y} = \left(1 - \frac{S_e}{S_y}\right) \bar{x} + S_e$$

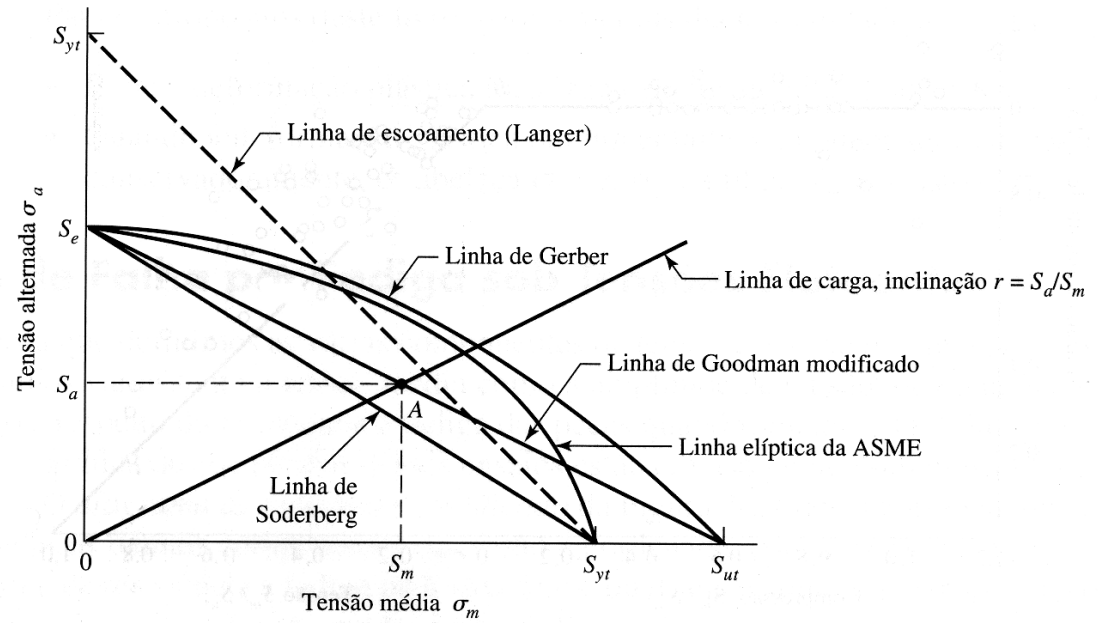
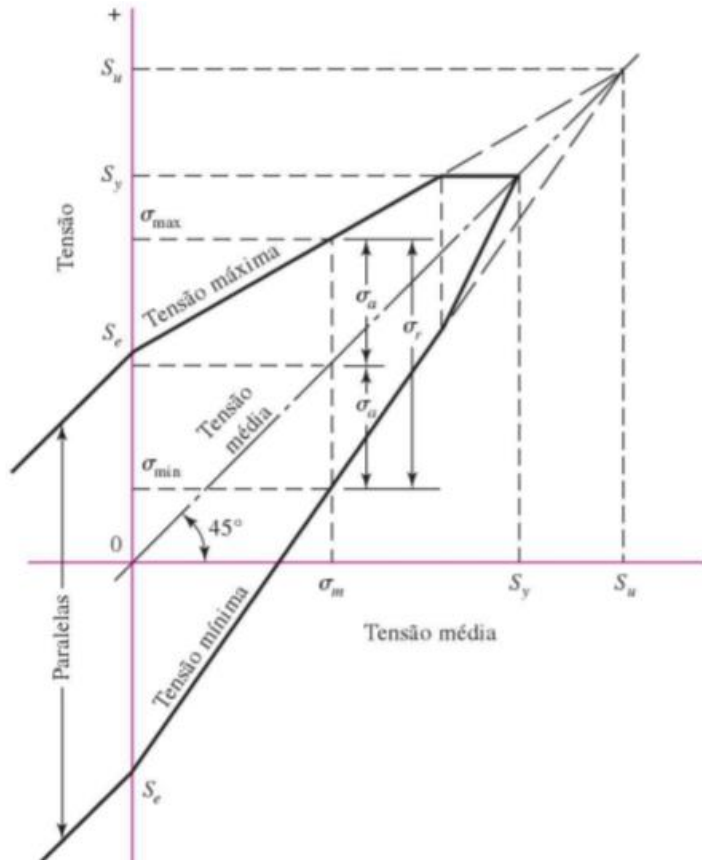
$$\bar{y} = \left(1 - \frac{S_e}{S_y}\right) \frac{\bar{y}}{k} + S_e$$

$$\bar{y} = S_e (k \neq \infty) = \frac{S_e}{1 - \frac{1}{k} \left(1 - \frac{S_e}{S_y}\right)}$$

ou

$$\bar{y} = S_e (k \neq \infty) = \frac{S_e}{1 - \frac{1}{k} \left(1 - \frac{S_e}{S_{ut}}\right)}$$

4.5- Diagrama de Smith Simplificado - Diagrama de Goodman



$$\text{Soderberg (1930)} \quad \frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_y} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1$$

$$\text{Goodman (1899)} \quad \frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1$$

$$\text{Gerber (1874)} \quad \frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_u} \right)^2 = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u} \right)^2 = 1$$

$$\text{ASME} \quad \left(\frac{S_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y} \right)^2 = 1 \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{\sigma_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{S_y} \right)^2 = 1$$

S_e = Limite de fadiga com média zero

S_{yt} = tensão de escoamento

S_m = resistência média

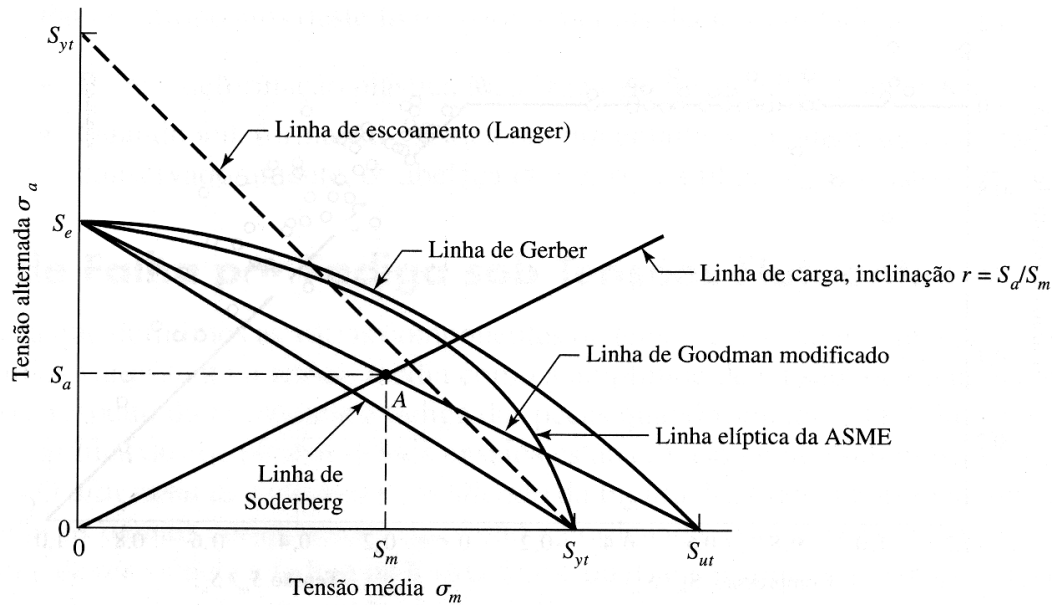
S_a = resistência alternante

σ_a = limite de fadiga com tensão diferente de zero

σ_m = tensão média

As tensões $n\sigma_a$ e $n\sigma_m$ podem substituir S_a e S_m , sendo n o fator de segurança

Diagrama de fadiga mostrando vários critérios de falha



S_{ut} = Resistência máxima a tração
 S_{yt} = tensão de escoamento
 S_m = resistência média
 S_a = resistência alternante

Para cada critério, pontos na linha, ou acima da respectiva linha indicam falha. Um ponto A na linha de Goodman, por exemplo, provê a resistência S_m como um valor limite de σ_m correspondente à resistência S_a , que, emparelhada com σ_m , é o valor limite de σ_a

Exercício

Para um determinado material dúctil são conhecidos os valores de S_y e de S_e ($S_e = 0,4 S_y$) para carregamentos cíclicos à tração. Um corpo de prova deste material é submetido a uma tração variável com $\sigma_{\max} = 0,6 S_y$ e $\sigma_{\min} = -0,2 S_y$ (valor negativo). Usando um gráfico em escala (aproximada), responder:

- O corpo de prova romperá? Justificar graficamente.
- Mantendo-se o mesmo valor de k , mostrar graficamente quais devem ser os valores de σ_{\max} e σ_{\min} para que se trabalhe no limite de resistência à fadiga.
- Refazer o cálculo anterior analiticamente.

EXERCÍCIO

$$\sigma_M = \sigma_{m\acute{o}x} = 0,6 S_y$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{o}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{0,6 S_y + (-0,2 S_y)}{2} = 0,2 S_y$$

$$k = \frac{\sigma_{m\acute{o}x}}{\sigma_m} = \frac{0,6 S_y}{0,2 S_y} = 3$$

$$S_e = 0,4 S_y \quad (k = \infty)$$

