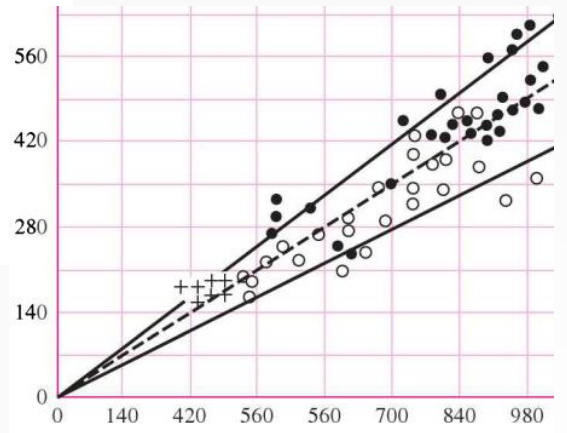
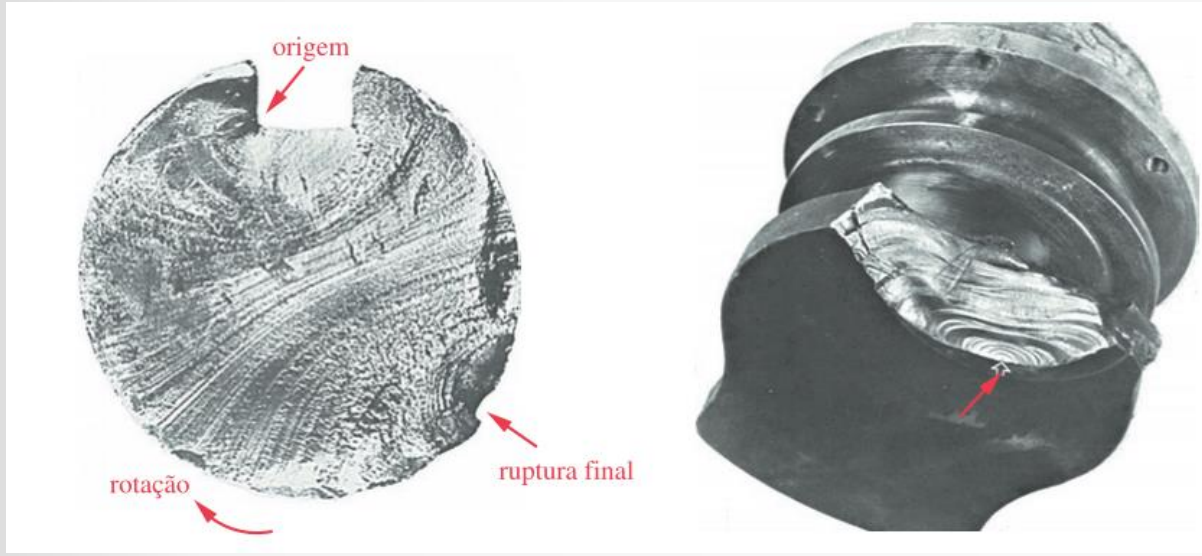
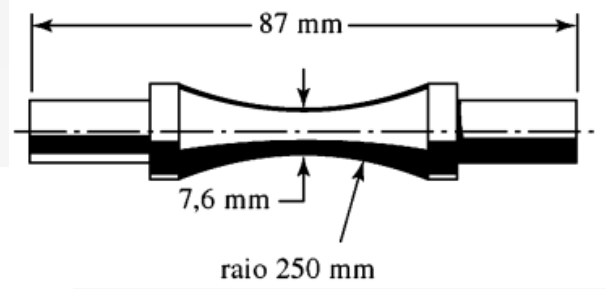


Elementos de Máquinas

Capítulo 2 Projeto à Fadiga



Acetatos e imagens baseados nos livros:
- Mechanical Engineering Design — Joseph Shigley. 8ª Edição. 2011. McGraw-Hill
- Projeto de Máquinas - Robert L. Norton
- Apontamentos – Rosa Mendes, EST, IPS



- Resistência dos Materiais => solicitações estáticas;
- Elementos de Máquinas => solicitações dinâmicas;

Fadiga - (causa de 80 a 90% de todas as ruínas de peças ou estruturas);

- ❑ Primeiras roturas por fadiga => meados do século XIX;
- ❑ Primeiros estudos => eng. Wohler, em eixos de locomotivas (1840);
- ❑ Antes dessa altura as máquinas eram de funcionamento rudimentar, essencialmente manual; a revolução industrial impôs grandes desafios tecnológicos aos engenheiros da época.



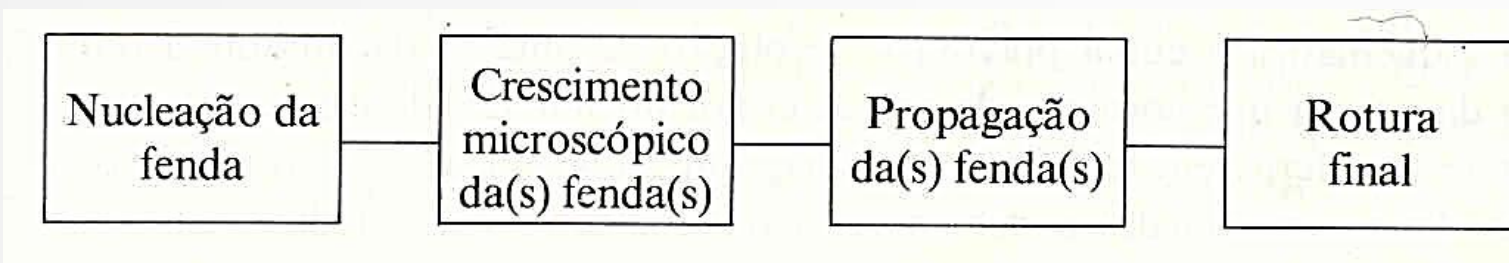
Projeto à Fadiga

Capítulo 2

A **fadiga** é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos, e que pode culminar em fendas ou numa fractura completa após um número suficiente de variações de carga.

O **intervalo de tempo** até à **ruptura** por fadiga dependente do nível de tensões aplicadas.

O processo de degradação por fadiga envolve as seguintes fases :





Processo de rotura por fadiga

Capítulo 2

A **iniciação da fenda** (pequena fenda microscópica) é um processo localizado num ponto da peça e ocorre geralmente em zonas :

- 1) elevadas concentração de tensões ;
- 2) variação brusca de geometria;
- 3) defeitos do material ;
- 4) defeitos de acabamento superficial.

Propagação por fadiga a partir do defeito inicial, a fenda de fadiga progride gradualmente, ciclo após ciclo de carregamento.

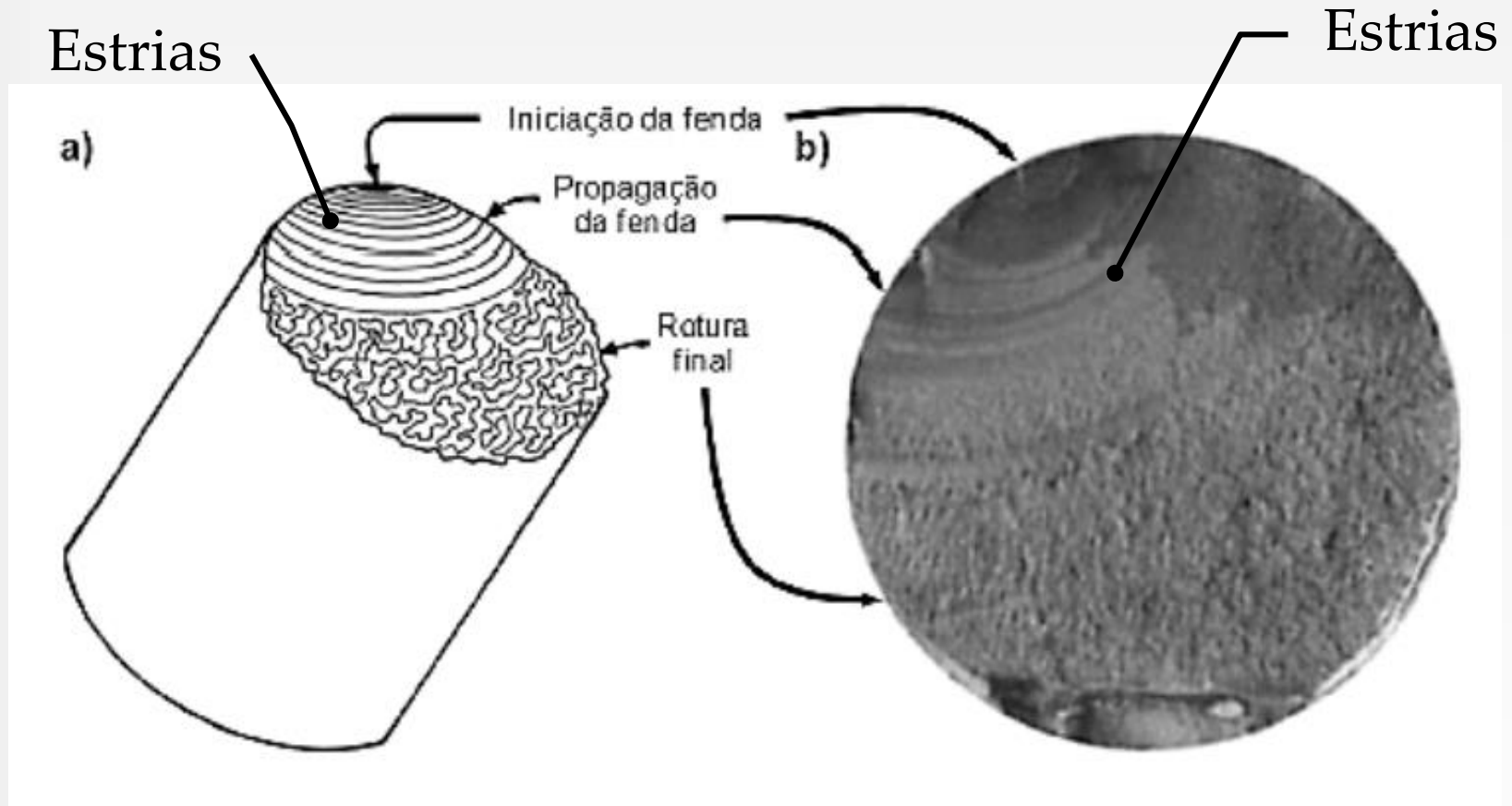
Zona de **rotura final** corresponde à ultima parte resistente da secção e apresenta-se normalmente uma textura rugosa.



Superfície de rotura por fadiga

Capítulo 2

Elementos de Máquinas

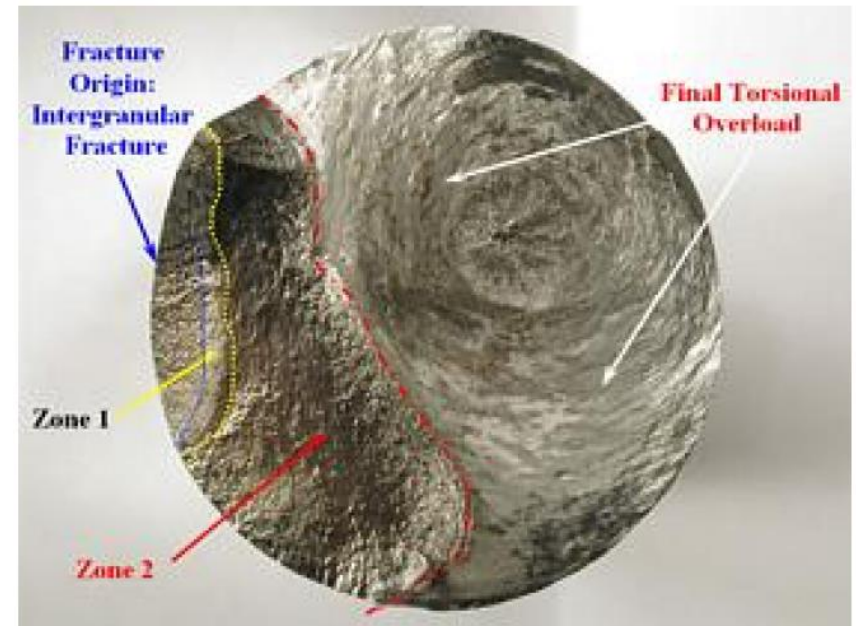
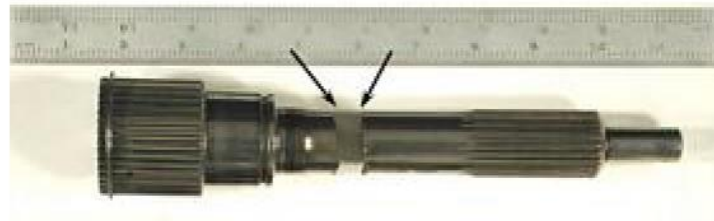


- A fratura ocorre sem aviso prévio
- As superfícies de fratura têm aspeto do tipo “frágil” sem sinais de deformação plástica a nível macroscópico



Superfície de rotura por fadiga

Capítulo 2



Os materiais quando submetidos a tensões flutuantes ou cíclicas (esforços dinâmicos) fraturam a tensões inferiores às dos ensaios de tração estáticas.



Formação das estrias na fadiga

Capítulo 2

Elementos de Máquinas

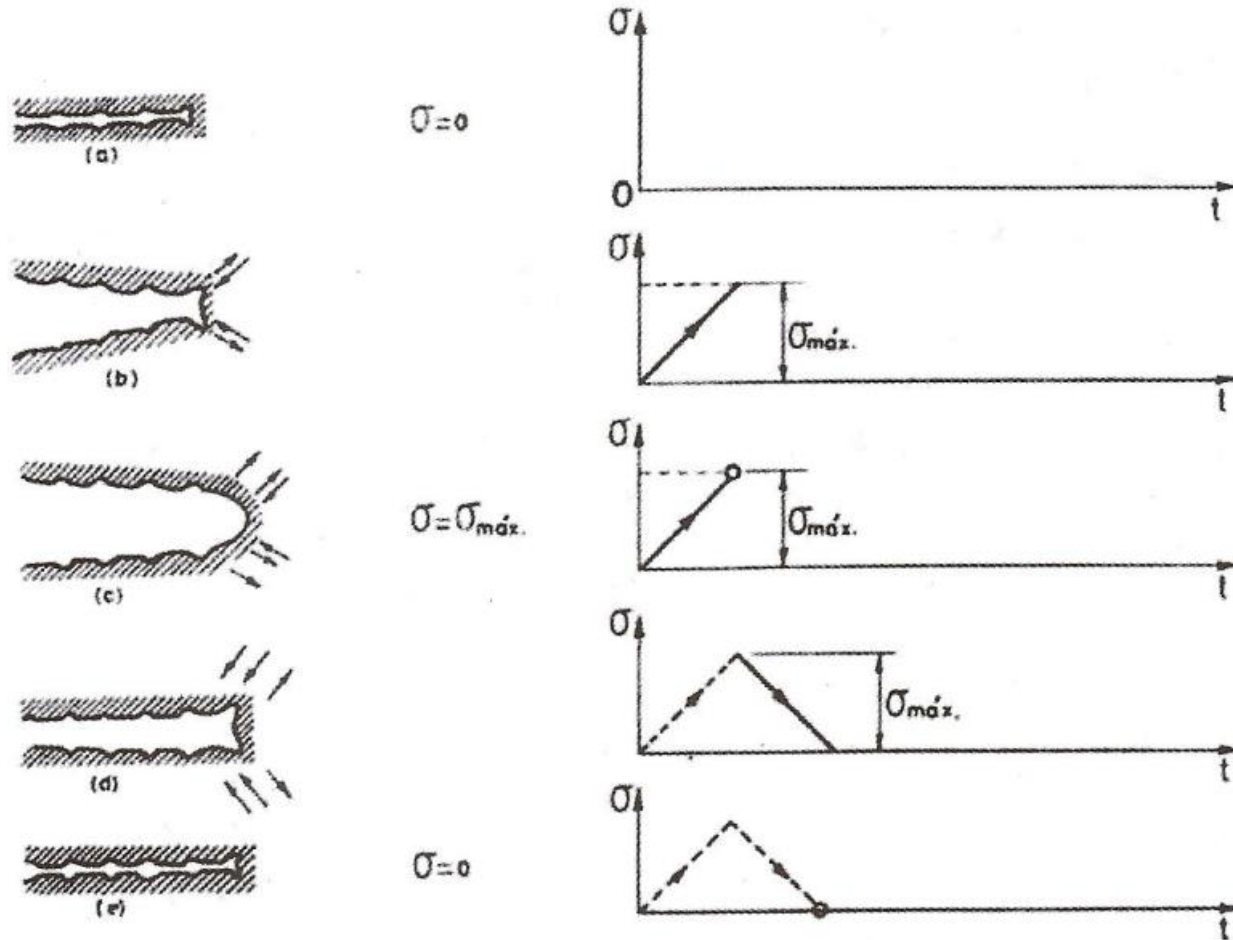


Figura 2.4 – Representação esquemática do processo de formação da estriação de fadiga



Superfície de rotura por fadiga – exemplo 1

Capítulo 2

Elementos de Máquinas

Figura 6-3

Fatura por fadiga de um eixo motor de aço AISI 4320. A falha por fadiga iniciou na extremidade de chaveta nos pontos *B* e progrediu até a ruptura final em *C*. A zona de ruptura final é pequena, indicando que as cargas eram baixas. (Extraído do ASM Handbook, vol. 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, figura 18, p. 111. Reimpresso com permissão da ASM International®, www.asminternational.org.)





Superfície de rotura por fadiga – exemplo 2

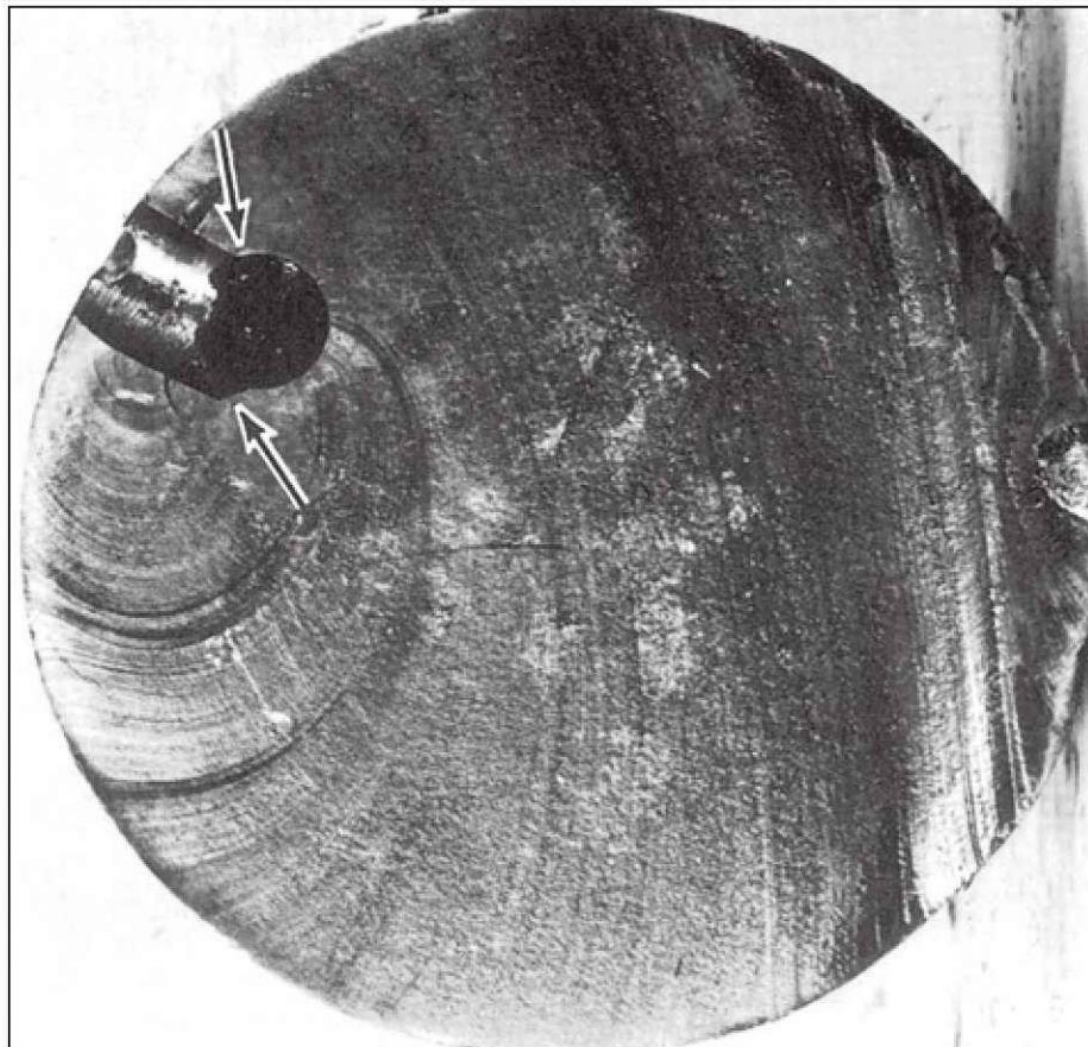
Capítulo 2

Elementos de Máquinas

Figura 6-4

Superfície de fratura por fadiga de um pino de aço AISI 8640. Cantos vivos de orifícios de graxa desencontrados proporcionaram concentrações de tensão que iniciaram duas trincas de fadiga indicadas pelas setas.

(Extraído do ASM Handbook, vol. 12: Fractography, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, figura 520, p. 331. Reimpresso com permissão da ASM International®, www.asminternational.org.)





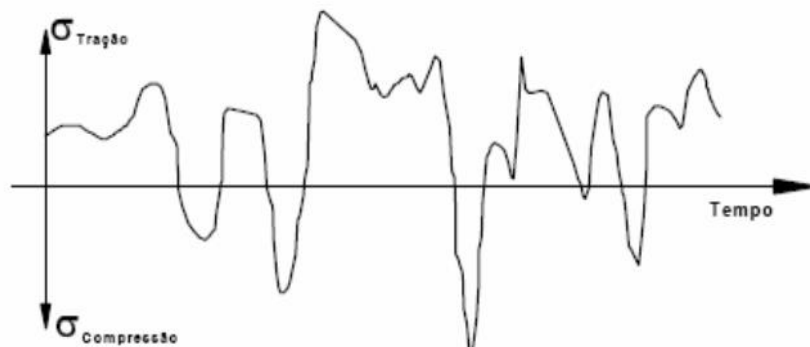
Tipos de solicitações dinâmicas

A fadiga ocorre quando as solicitações são dinâmicas (variam com o tempo). Temos 2 tipos de ciclos de tensão:

- Amplitude variável
- Amplitude constante.

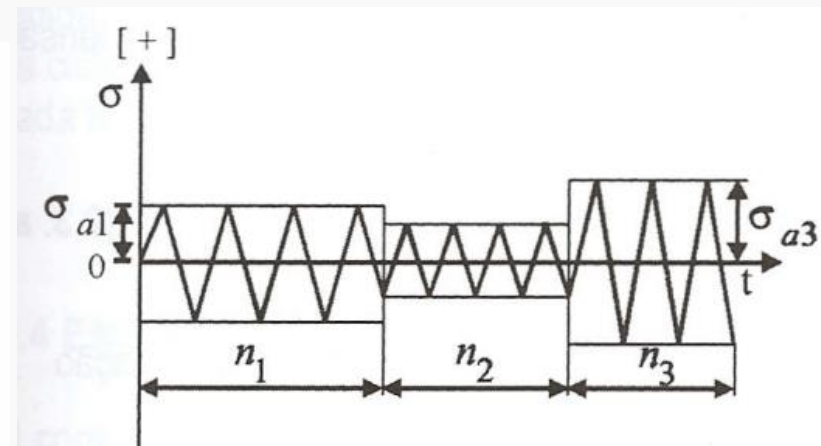
Amplitude Variável

Tensão Aleatória



C) Tensão irregular aleatória (Vibrações Complexas)

Blocos

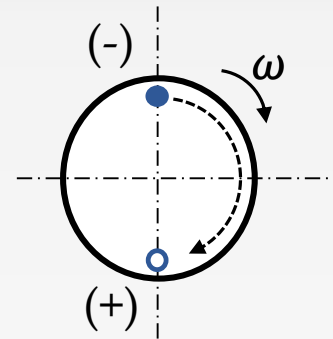
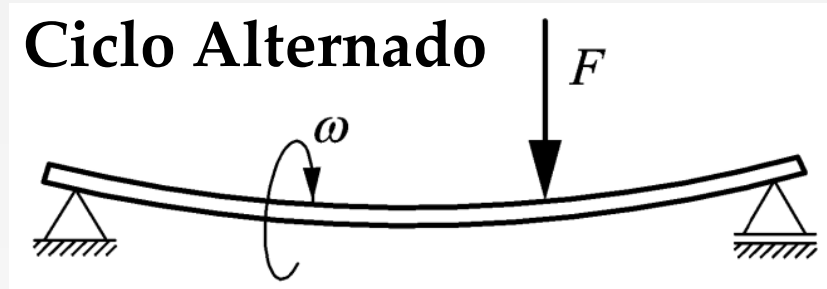




Solicitações dinâmicas de Amplitude Constante

Existem 3 tipos de ciclos de amplitude constante:

- Alternado
- Repetido
- Pulsante



$$\sigma = \sigma_a \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad \omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

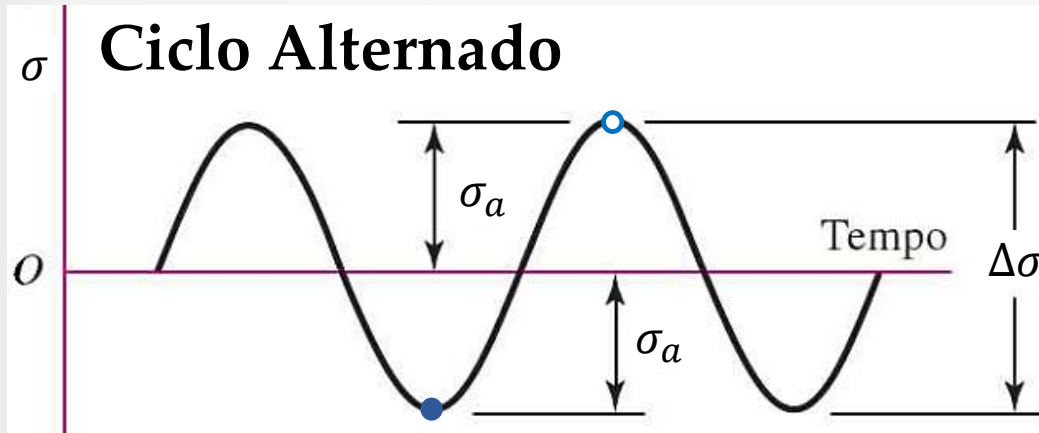
n - [rpm]

Tensão alternada

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

Tensão média

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



$$\sigma_m = 0$$

$$R = -1$$

Razão de Tensões

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

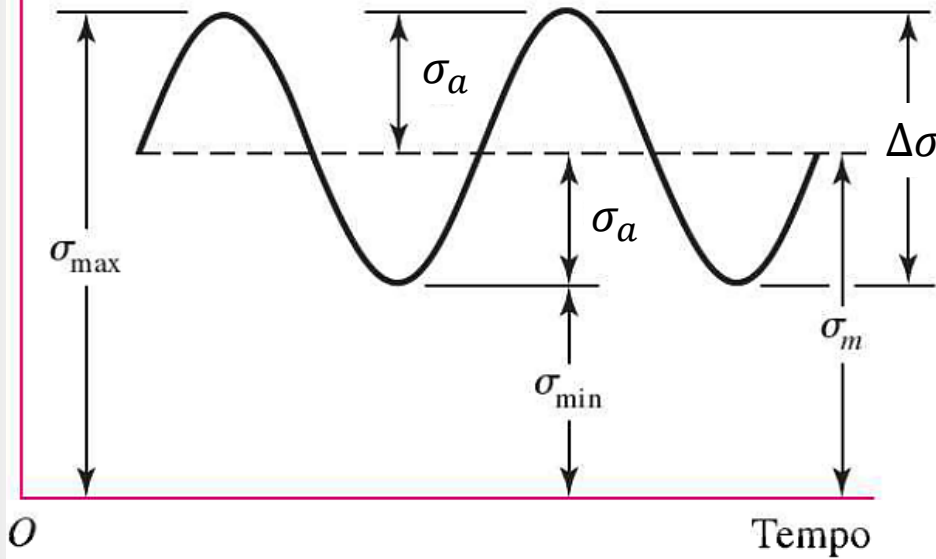
Gama de Tensões

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



Solicitações dinâmicas de Amplitude Constante

Ciclo Repetido



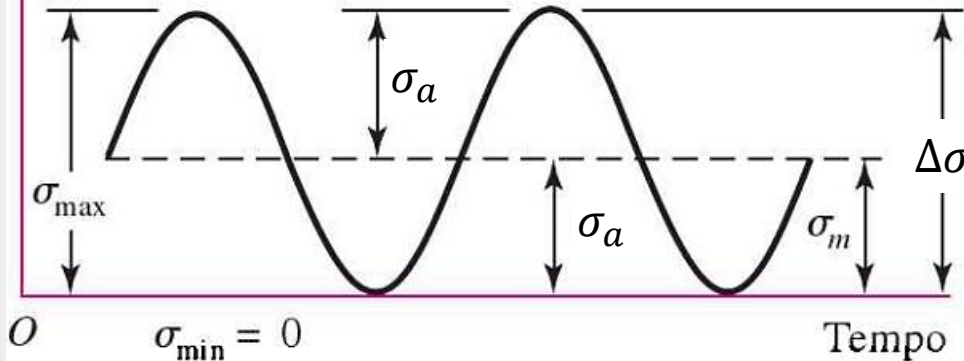
$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

$$\sigma_m \neq 0$$

$$\sigma_{min} \neq 0 \text{ ou } \sigma_{max} \neq 0$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

Ciclo Pulsante



$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

$$\sigma_m \neq 0$$

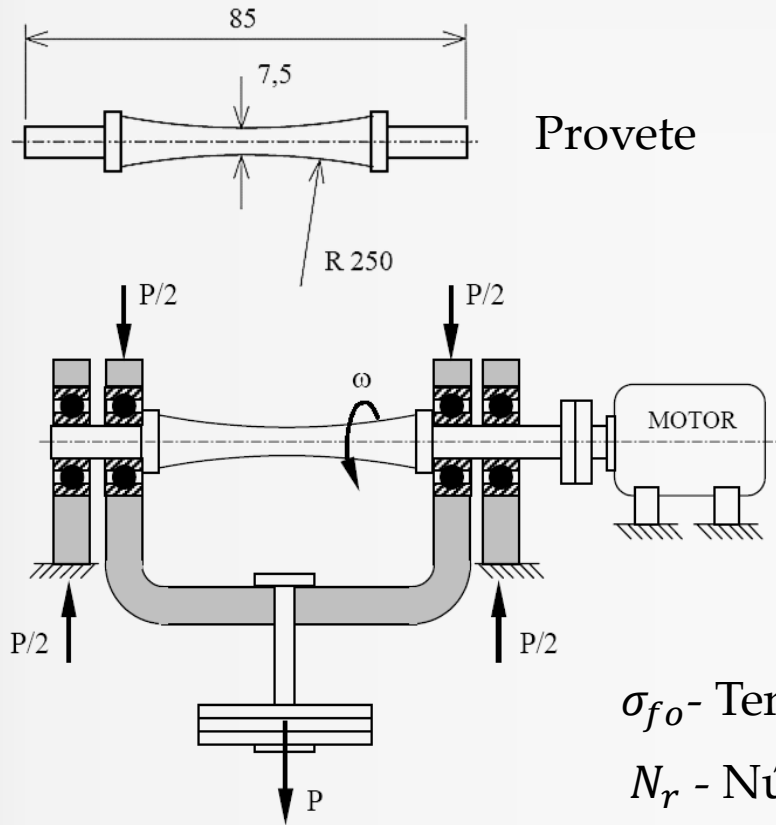
$$\sigma_{min} = 0 \text{ ou } \sigma_{max} = 0$$



Ensaio à fadiga - Curva S-N

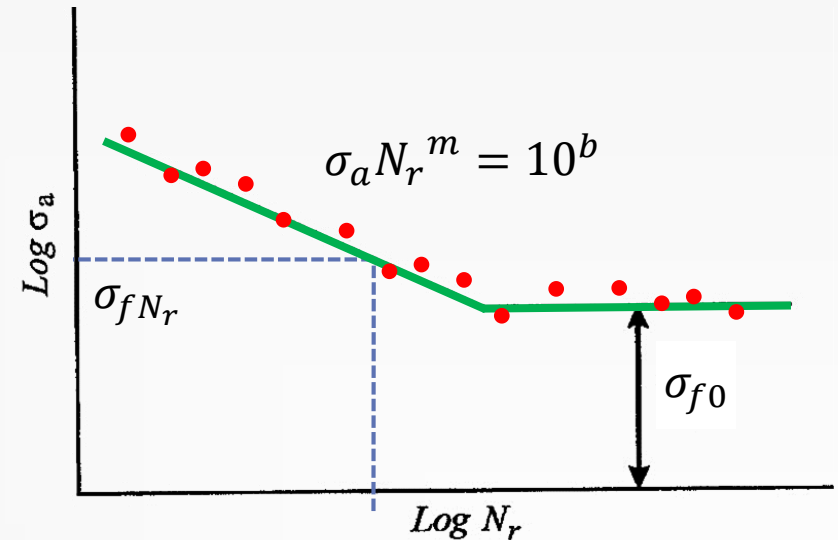
Consiste em submeter os provetes a ciclos de esforços repetidos, sinusoidais, de amplitude e frequência constantes com tensões máximas diferentes obtendo uma curva no plano (σ, N) , curva S-N ou curva tensão – numero de ciclos até à rotura.

Ensaio de fadiga à flexão rotativa



σ_a - Tensão alternada

$\sigma_a \Leftrightarrow \sigma_f$ - Resistência à Fadiga

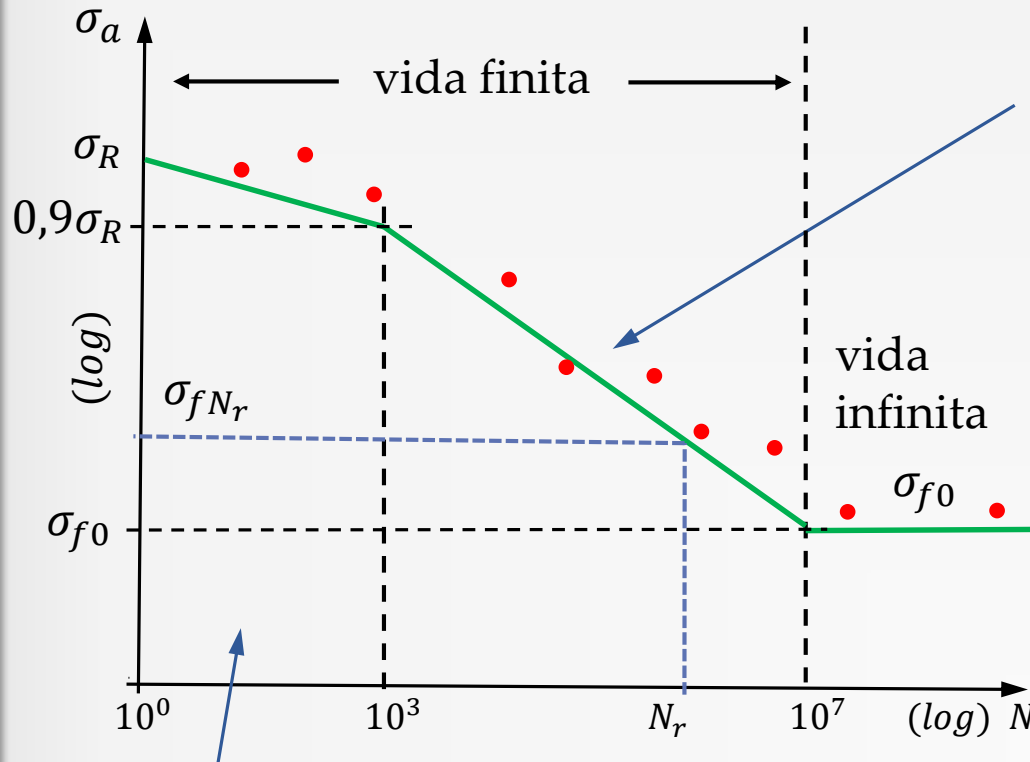


σ_{f0} - Tensão Limite de Fadiga de ensaio (provetes)

N_r - Número de ciclos até a rotura (vida)



Curva S-N - Resistência à Fadiga - Aços



Equação da curva S-N

$$\text{Log}(\sigma_f) = -m \cdot \text{Log}(N_r) + b$$

$$10^3 < N_r < 10^7$$

$$0,9\sigma_R < \sigma_f < \sigma_{f0}$$

b e m são constantes do material e dependem das condições do ensaio.

$$\begin{cases} b = \frac{1}{4} \text{Log} \left(\frac{(0,9\sigma_R)^7}{\sigma_{f0}^3} \right) \\ m = \frac{1}{4} \text{Log} \left(\frac{0,9\sigma_R}{\sigma_{f0}} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_f = 10^b N_r^{-m} \\ N_r = \left(\frac{10^b}{\sigma_f} \right)^{\frac{1}{m}} \end{cases}$$

Fadiga Oligocíclica $N_r < 10^3$

- Tensões ou deformações elevadas (plástica)

σ_R - Resistência à tração

σ_{f0} - Tensão Limite de Fadiga de ensaio (proвете)

N_r - Número de ciclos até a rotura (vida)



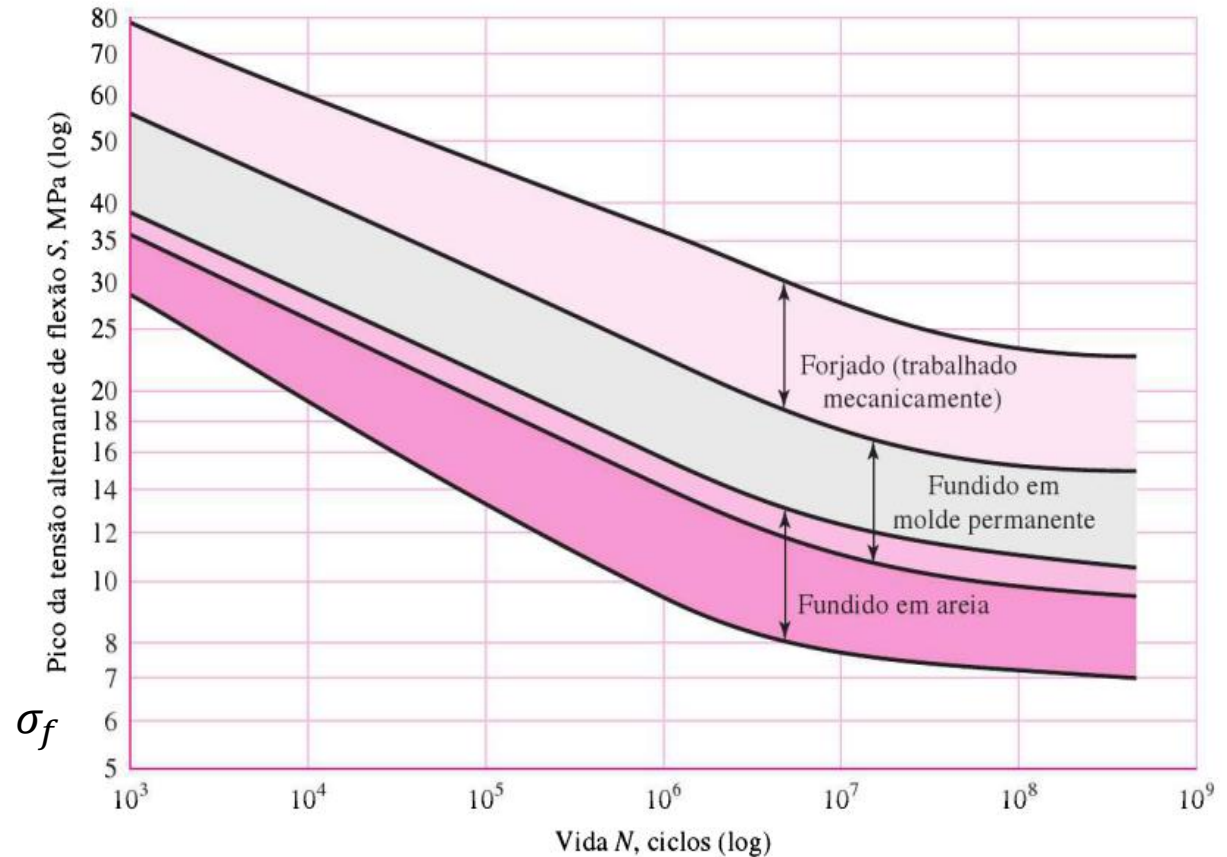
Curva S-N - Resistência à Fadiga – Ligas de Alumínio

Capítulo 2

Elementos de Máquinas

Figura 6-11

Bandas S-N para ligas de alumínio representativas, excluindo ligas forjadas com $S_{ut} < 260$ MPa. (Extraído de R.C. Juvinall, Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength. Copyright ©1967 by The McGraw-Hill Companies, Inc. Reimpresso com permissão.)





Curva S-N - Resistência à Fadiga - Polímeros

Capítulo 2

Elementos de Máquinas

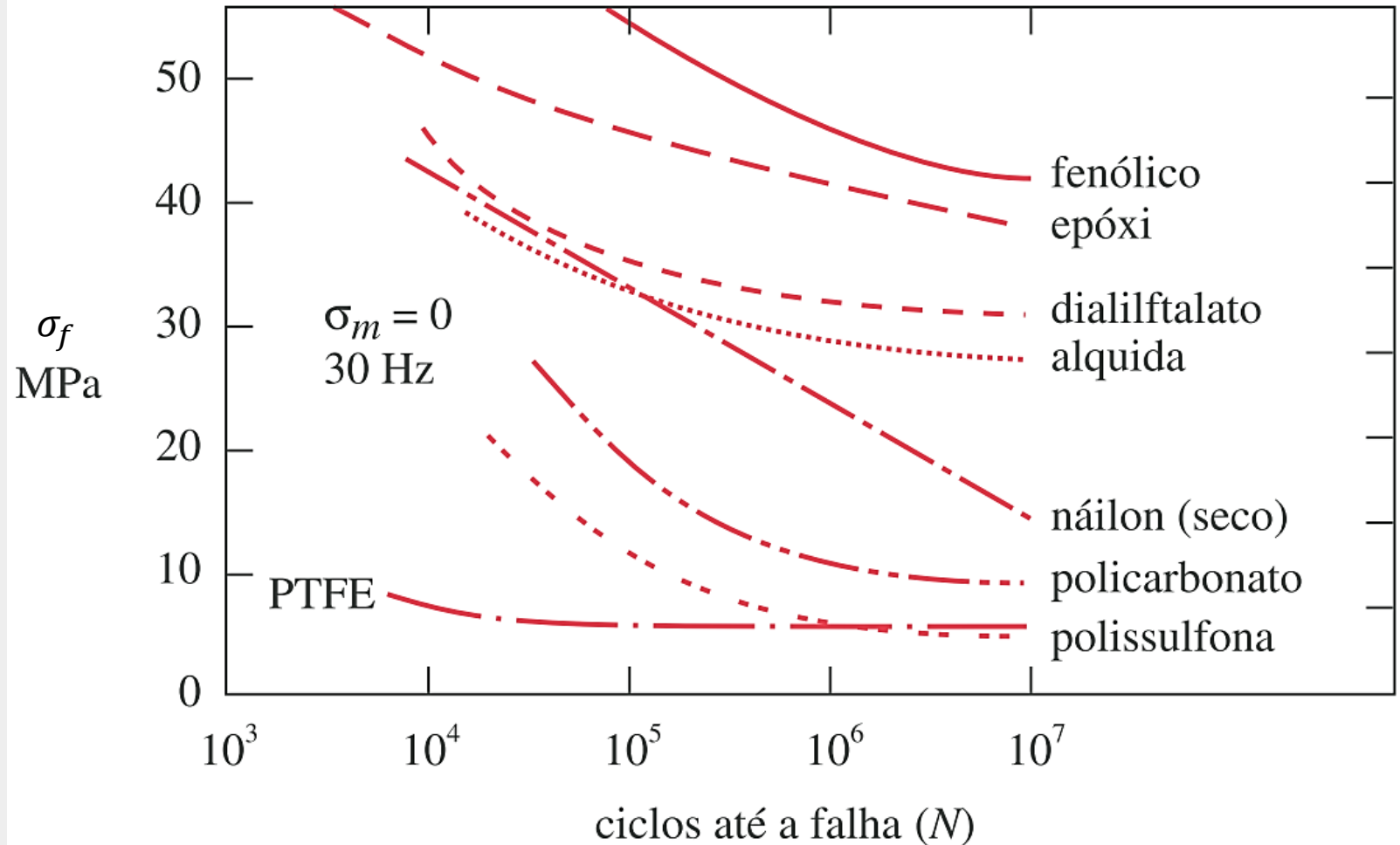


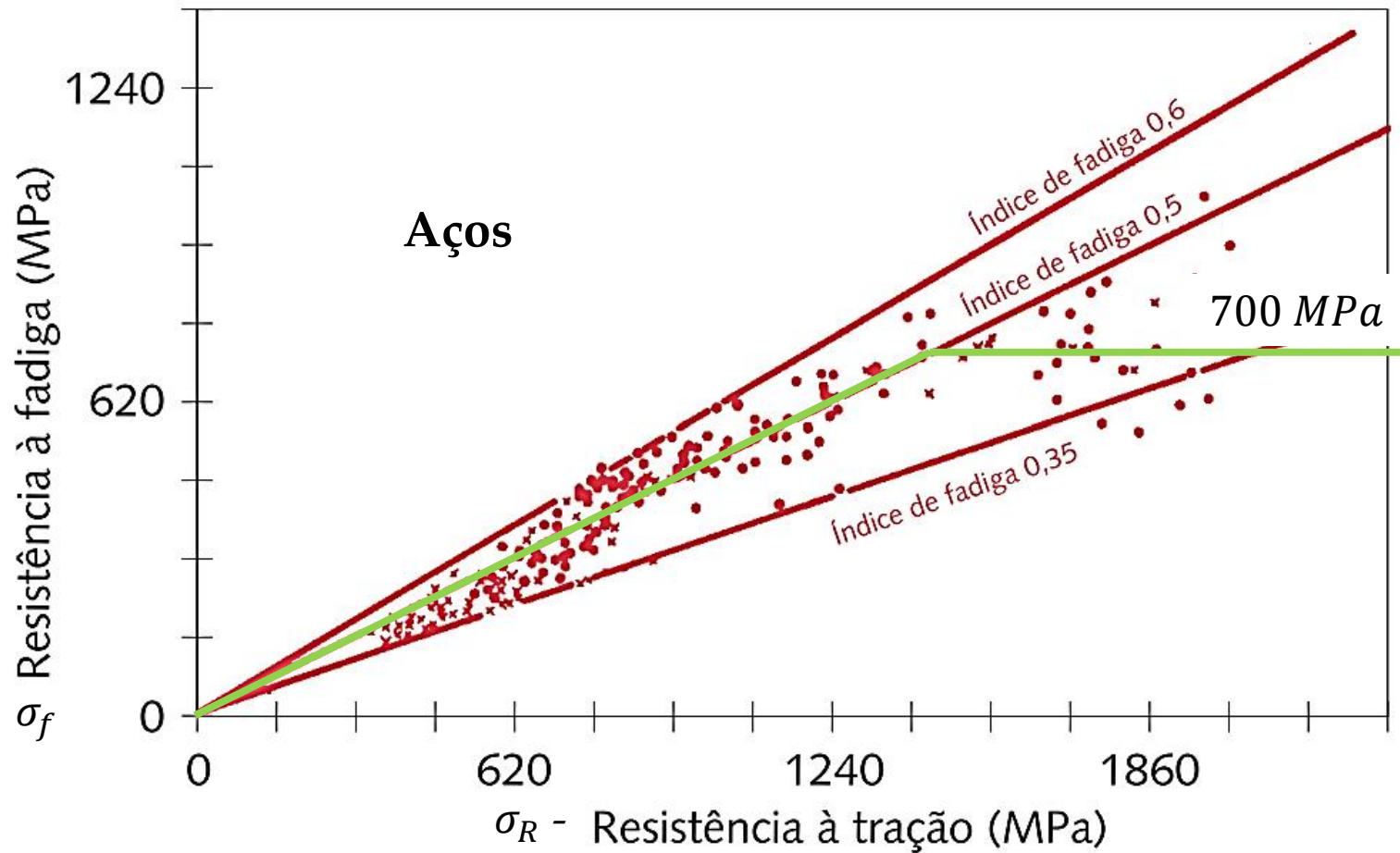
Figura de N. E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1996, Fig. 9-22, p. 362



σ_{f0} - Tensão Limite de Fadiga - Aços

Capítulo 2

Elementos de Máquinas



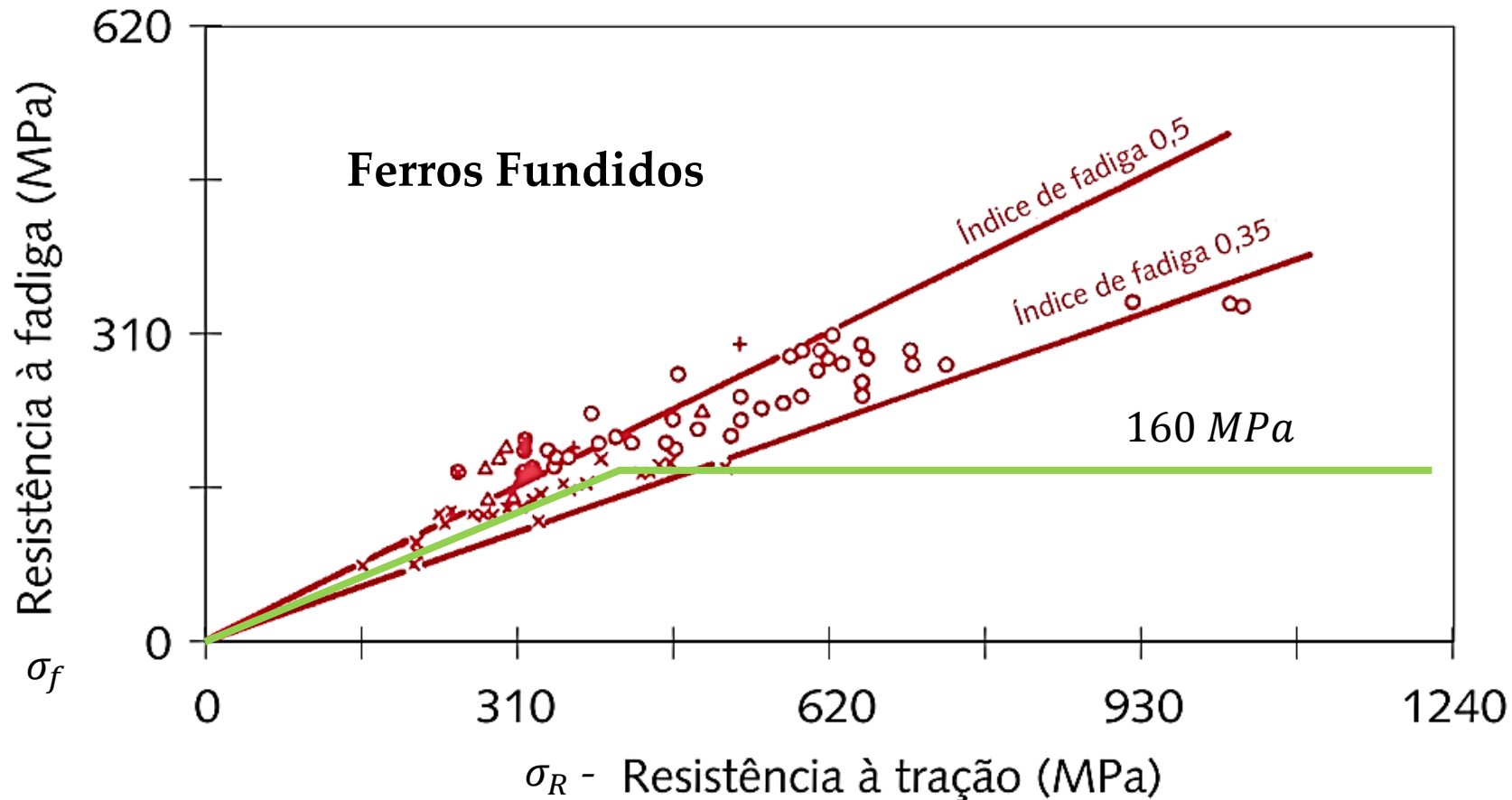
$$\begin{cases} \sigma_{f0} = 0,5\sigma_R & \text{para } \sigma_R \leq 1400\text{MPa} \\ \sigma_{f0} = 700\text{MPa} & \text{para } \sigma_R > 1400\text{MPa} \end{cases}$$



σ_{f0} - Tensão Limite de Fadiga – Ferros Fundidos

Capítulo 2

Elementos de Máquinas



$$\begin{cases} \sigma_{f0} = 0,4\sigma_R & \text{para } \sigma_R \leq 400\text{MPa} \\ \sigma_{f0} = 160\text{ MPa} & \text{para } \sigma_R > 400\text{MPa} \end{cases}$$

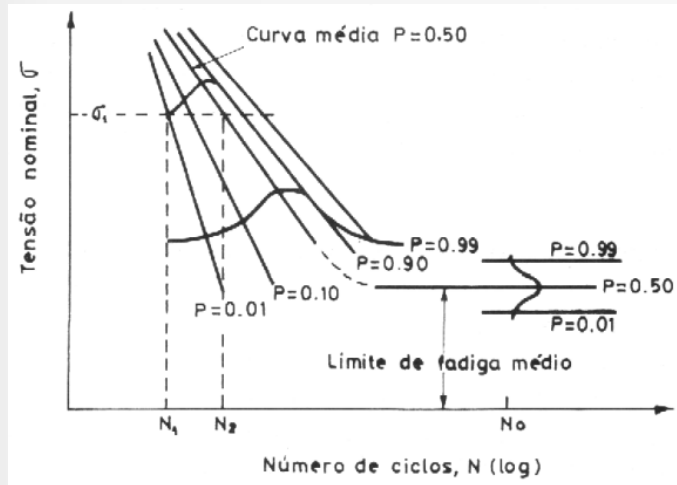


Parâmetros que influenciam as curvas S-N

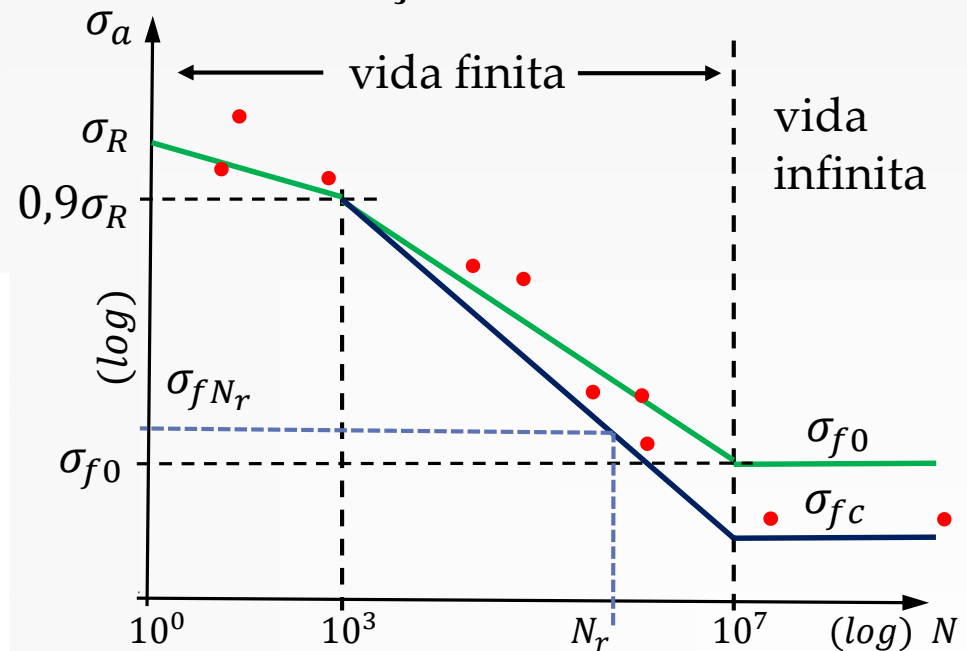
O comportamento dos materiais à fadiga é influenciado por um conjunto de variáveis :

- Concentração de tensões
- Estrutura metalúrgica do material
- Estado superficial das peças
- Tensão média
- Tamanho das peças
- Meio ambiente
- Temperatura

— Curva básica
— Curva corrigida



Correção da curva S-N





Tensão Limite de Fadiga Corrigida

$$\sigma_{fc} = (K_s \cdot K_b \cdot K_{fb} \cdot K_T) \cdot \sigma_{f0}$$

σ_{fc} - Tensão Limite de Fadiga Corrigida

σ_{f0} - Tensão Limite de Fadiga de ensaio (provete)

Coeficientes de correção

{	K_s	– Coeficiente de acabamento Superficial
	K_b	– Coeficiente de tamanho (body)
	K_{fb}	– Coeficiente de fiabilidade
	K_T	– Coeficiente de Temperatura



Correção da Tensão Limite de Fadiga

K_s - Coeficiente de acabamento superficial

$$K_s = a \cdot \sigma_R^b$$

σ_R - [MPa]

Acabamento superficial	a	b
Retificado	1,58	-0,085
Maquinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

K_b - Coeficiente de tamanho (body)

$$K_b = \begin{cases} 1,24 \cdot d^{-0,107} & \text{para } 2,79 < d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51 \cdot d^{-0,157} & \text{para } 51 < d \leq 254 \text{ mm} \\ 0,63 & \text{para } d > 254 \text{ mm} \end{cases} \quad \begin{array}{l} d \text{ é o diâmetro} \\ \text{do veio a rodar} \end{array}$$

ou

$$K_b = \begin{cases} 1 & \text{para } d \leq 7,5 \text{ mm} \\ 0,85 & \text{para } 7,5 < d \leq 50 \text{ mm} \\ 0,75 & \text{para } d > 50 \text{ mm} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Valores aproximados para o} \\ \text{calculado do diâmetro } d \end{array}$$

- $d \equiv h$, h é a altura da secção para secções não circulares submetidas à flexão.
- Em solicitações à tração não existe efeito de tamanho, $K_b = 1$.



Correção da Tensão Limite de Fadiga

K_{fb} – Coeficiente de fiabilidade

Fiabilidade	K_{fb}
50%	1,000
90%	0,897
95%	0,868
99%	0,814
99,9%	0,753
99,99%	0,702
99,999%	0,659
99,9999%	0,620

K_T – Coeficiente de temperatura

Temperatura	K_T
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549



Correção da Tensão Limite de Fadiga

K_f - Fator de concentração de tensões dinâmico

q - Fator de sensibilidade ao entalhe

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

$q = 0$ - Ausência de sensibilidade ($K_f = 1$)

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

A sensibilidade ao entalhe é função do material e da dimensão característica do entalhe r .

Axial

$$\sigma_{max} = K_{fa}\sigma_0$$

$$K_{fa} = q_a(K_{ta} - 1) + 1$$

Flexão

$$\sigma_{max} = K_{ff}\sigma_0$$

$$K_{ff} = q_f(K_{tf} - 1) + 1$$

Torção

$$\tau_{max} = K_{ft}\tau_0$$

$$K_{ft} = q_t(K_{tt} - 1) + 1$$

Fator de concentrações de tensões

K_{ta} - **estático axial**

K_{fa} - **dinâmico axial**

K_{tf} - **estático à flexão**

K_{ff} - **dinâmico à flexão**

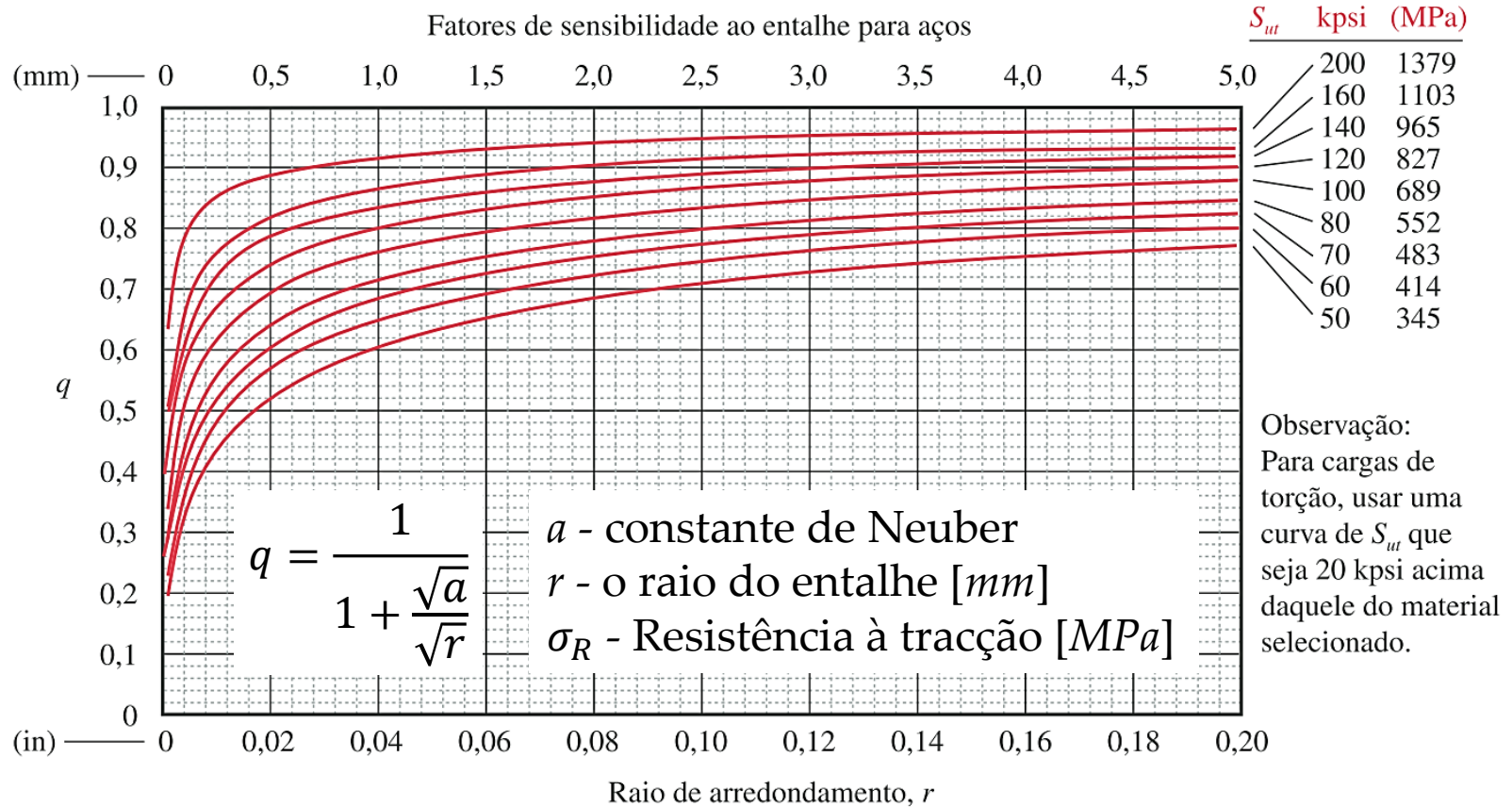
K_{tt} - **estático à torção**

K_{ft} - **dinâmico à torção**



Correção da Tensão Limite de Fadiga

Fator de sensibilidade ao entalhe q – (Axial e Flexão) e Torção



Aços (Axial ou Flexão) >>

$$\sqrt{a} = 1,237e^{-0,00195 \cdot \sigma_R}$$

σ_R - [MPa]

Aços (Torção) >>

$$\sqrt{a} = 1,237e^{-0,00195 \cdot (\sigma_R + 138)}$$



Dimensionamento – Uniaxial com $\sigma_m = 0$

Dimensionamento para uma vida infinita [$N_r > 10^7$]

$$\sigma_f = \sigma_{fc} = (K_s \cdot K_b \cdot K_{fb} \cdot K_T) \cdot \sigma_{f0} \quad \sigma_f - \text{Resistência à Fadiga} \equiv (\sigma_{fc} \text{ ou } \sigma_{fN_r})$$

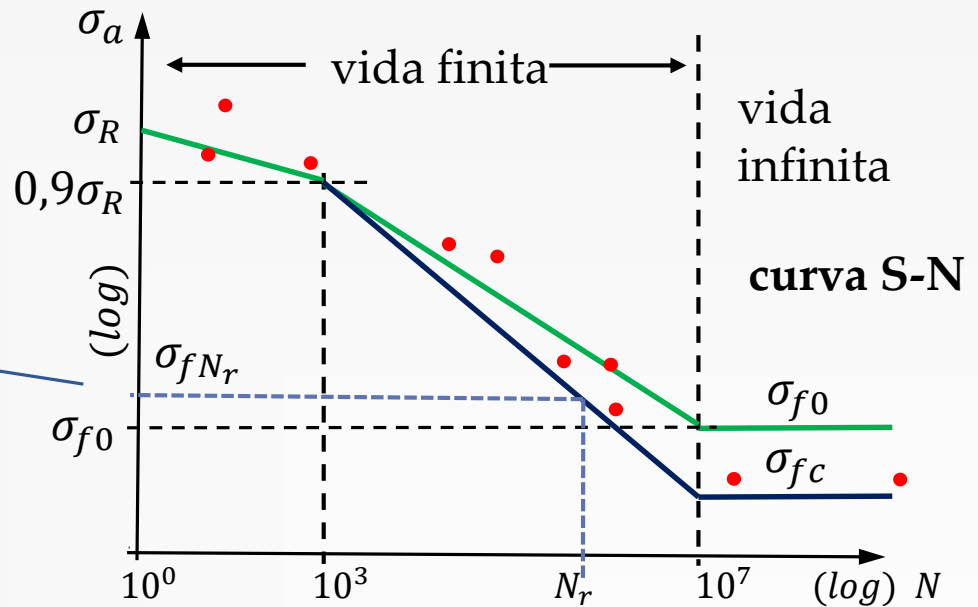
Dimensionamento para uma vida finita [$10^3 < N_r < 10^7$]

$$\begin{cases} b = \frac{1}{4} \text{Log} \left(\frac{(0,9\sigma_R)^7}{\sigma_{fc}^3} \right) \\ m = \frac{1}{4} \text{Log} \left(\frac{0,9\sigma_R}{\sigma_{fc}} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_{fN_r} = 10^b N_r^{-m} \\ N_r = \left(\frac{10^b}{\sigma_{fN_r}} \right)^{\frac{1}{m}} \end{cases} \quad \sigma_f = \sigma_{fN_r}$$

$$\sigma_a < \frac{\sigma_f}{n_f}$$

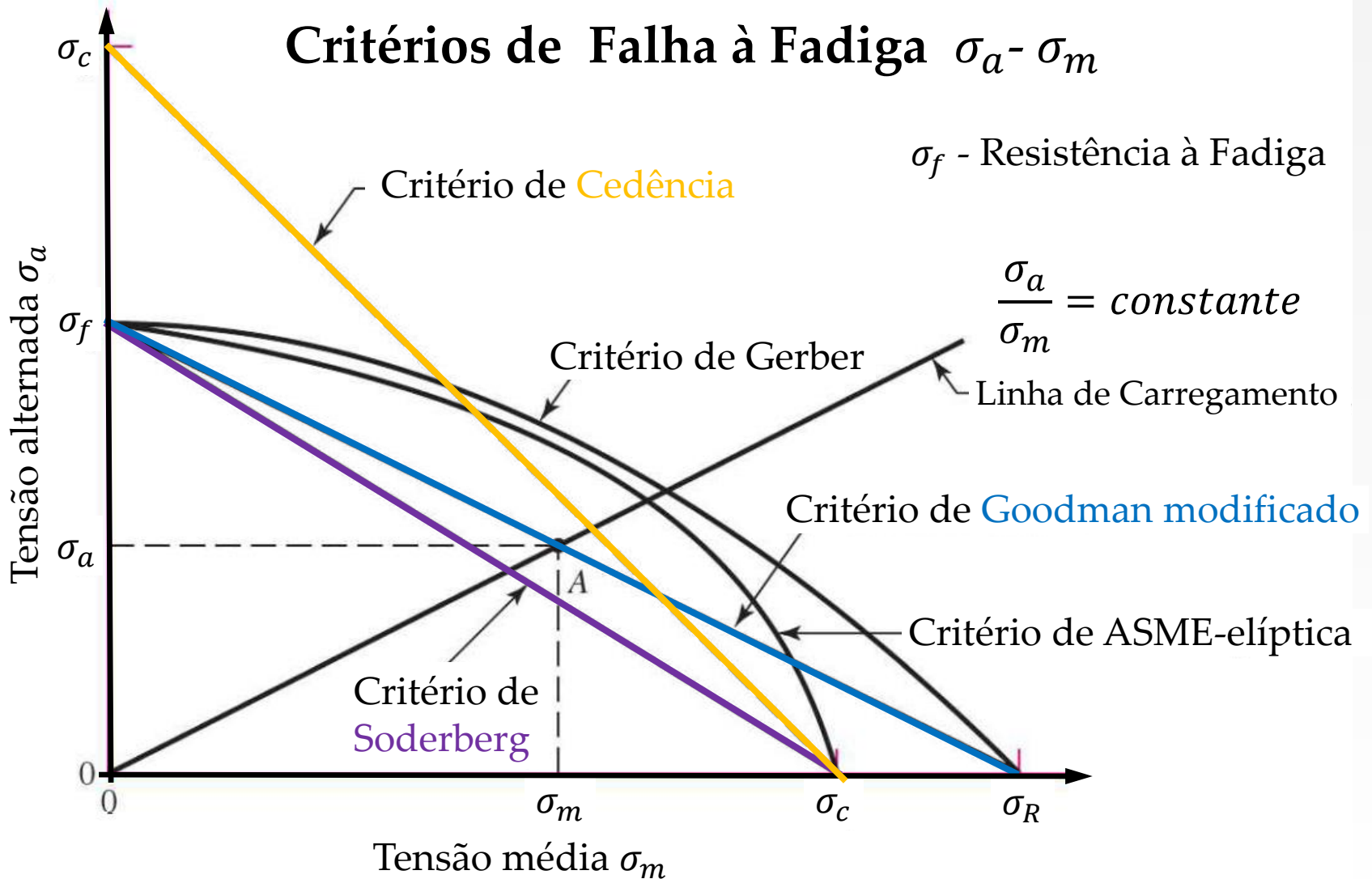
$$\sigma_a = K_{fa} \cdot \sigma_a^F + K_{ff} \cdot \sigma_a^M$$



σ_{fc} - Tensão Limite de Fadiga Corrigida
 σ_{fN_r} - Resistência à Fadiga para N_r
 n_f - Coeficiente de segurança dinâmico



Ciclo repetidos





CrITÉRIOS de Falha à Fadiga - Uniaxial com $\sigma_m > 0$

Capítulo 2

CrITÉRIO de Soderberg

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_c} = \frac{1}{n_f}$$

CrITÉRIO de Gerber

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

CrITÉRIO de Goodman modificado

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

CrITÉRIO de ASME-elíptica

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

CrITÉRIO de Cedência

$$\sigma_a + \sigma_m = \frac{\sigma_c}{n}$$

σ_a - Tensão alternada

σ_m - Tensão média

σ_c - Tensão de cedência

σ_R - Resistência à tração ou tensão de rotura

σ_f - Resistência à Fadiga

n - Coeficiente de segurança estático

n_f - Coeficiente de segurança dinâmico

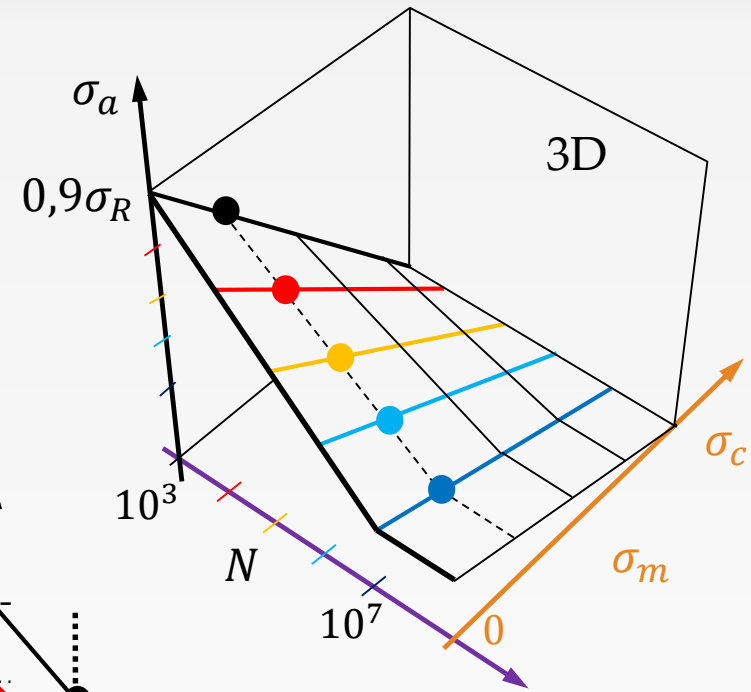
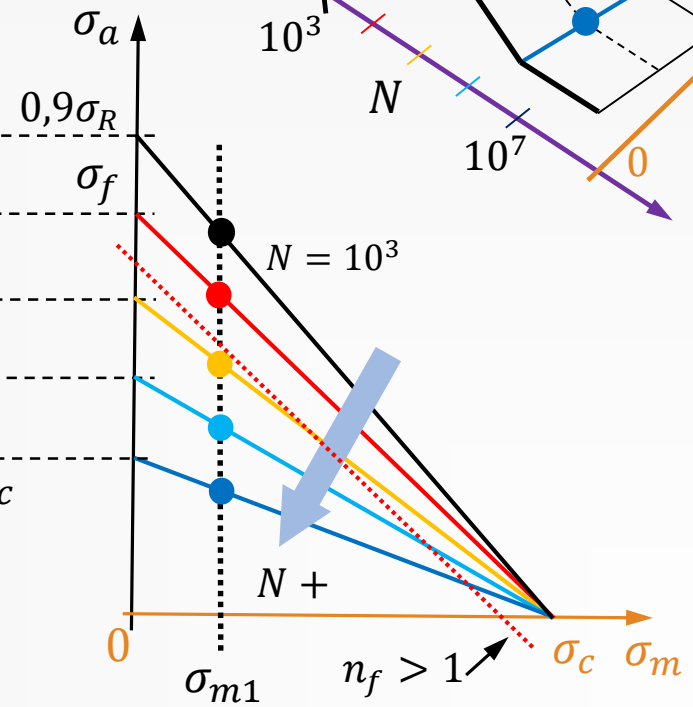
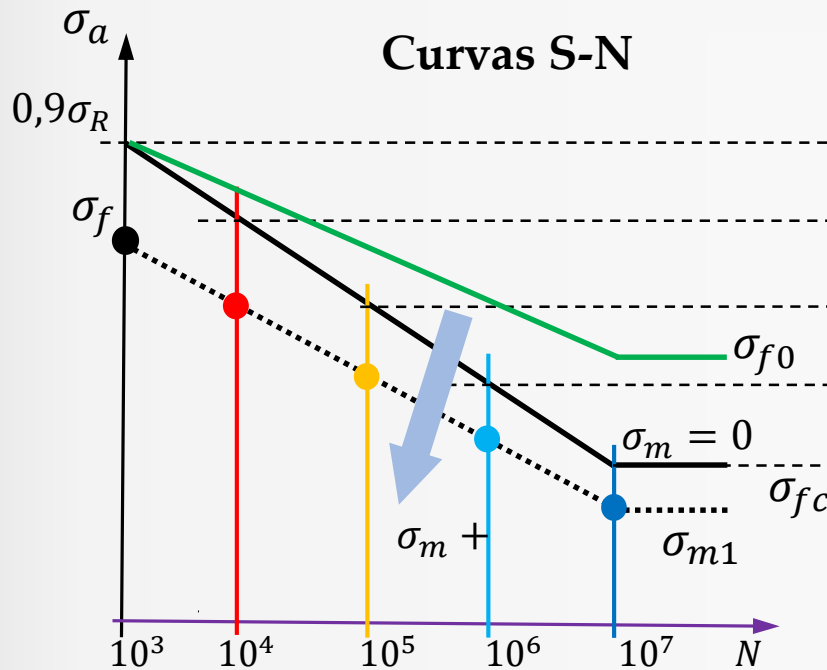


Cr terios de Falha   Fadiga - Uniaxial com $\sigma_m > 0$

Cap tulo 2

Cr terio de Soderberg (exemplo)

Rela o entre as curvas $S-N$ e $\sigma_a-\sigma_m$





Dimensionamento à Fadiga - Uniaxial com $\sigma_m > 0$

Dimensionamento à Fadiga

$$\sigma_f \equiv (\sigma_{fc} \text{ ou } \sigma_{fN_r})$$

Critério de **Soderberg** (exemplo)

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_c} = \frac{1}{n_f} \Rightarrow \sigma_a = \sigma_f \left(\frac{1}{n_f} - \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right) \Rightarrow \sigma_a < \sigma_f \left(\frac{1}{n_f} - \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right)$$

Se o veio tiver uma concentração de tensões e estiver sujeito a uma força axial repetida F e a um momento fletor repetido M, temos

Para materiais dúcteis

$$\sigma_a = K_{fa} \cdot \sigma_a^F + K_{ff} \cdot \sigma_a^M$$

$$\sigma_m = K_{fa} \cdot \sigma_m^F + K_{ff} \cdot \sigma_m^M$$

Para materiais frágeis:

$$\sigma_a = K_{fa} \cdot \sigma_a^F + K_{ff} \cdot \sigma_a^M$$

$$\sigma_m = K_{ta} \cdot \sigma_m^F + K_{tf} \cdot \sigma_m^M$$

- Para vida infinita [$N_r > 10^7$] $\Rightarrow \sigma_f = \sigma_{fc} = (K_S \cdot K_b \cdot K_{fb} \cdot K_T) \cdot \sigma_{f0}$

- Para vida finita [$10^3 < N_r < 10^7$] $\Rightarrow \sigma_f = \sigma_{fN_r} = 10^b N_r^{-m}$

Verificação estática no 1º ciclo

$$\sigma_a + \sigma_m < \sigma_c$$



Dimensionamento à Fadiga - Biaxial com $\sigma_m > 0$

Solicitações combinadas, flexão composta com torção.

Se o veio tiver uma concentração de tensões e estiver sujeito a uma força axial repetida F, a um momento fletor repetido M e um momento torsor repetido T, temos um estado biaxial de tensão.

Tensão Alternada Equivalente

$$\sigma_{eqa} = \sqrt{[K_{fa} \cdot \sigma_a^F + K_{ff} \cdot \sigma_a^M]^2 + 3[K_{ft} \cdot \tau_a^T]^2}$$

Tensão Média Equivalente

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{[K_{fa} \cdot \sigma_m^F + K_{ff} \cdot \sigma_m^M]^2 + 3[K_{ft} \cdot \tau_m^T]^2}$$

Dimensionamento à Fadiga

Critério de **Soderberg** (exemplo)

$$\sigma_{eqa} < \sigma_f \left(\frac{1}{n_f} - \frac{\sigma_{eqm}}{\sigma_c} \right) \quad \sigma_f \equiv (\sigma_{fc} \text{ ou } \sigma_{fN_r})$$

Verificação

estática no 1º ciclo

$$\sigma_{eqa} + \sigma_{eqm} < \sigma_c$$