



# AULA 4 – Fadiga dos metais



Prof. Dr. Jaime Duduch

# 1. Introdução à fadiga dos metais

## ■ Histórico



### ➤ Wohler em 1872 *“on the mechanical tests on iron and steel”*

A tensão com que se rompiam em serviço alguns eixos de vagões ferroviários estava bem abaixo que a tensão que suportava estaticamente

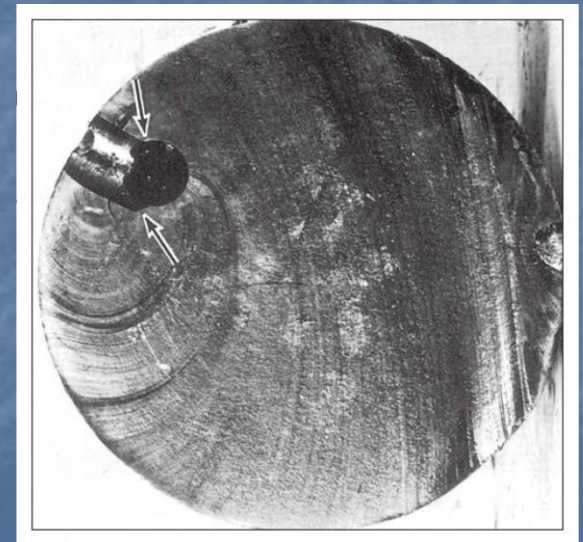
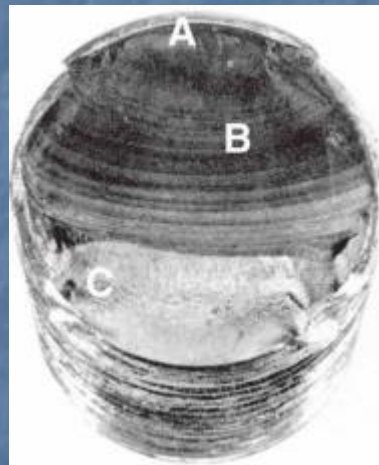
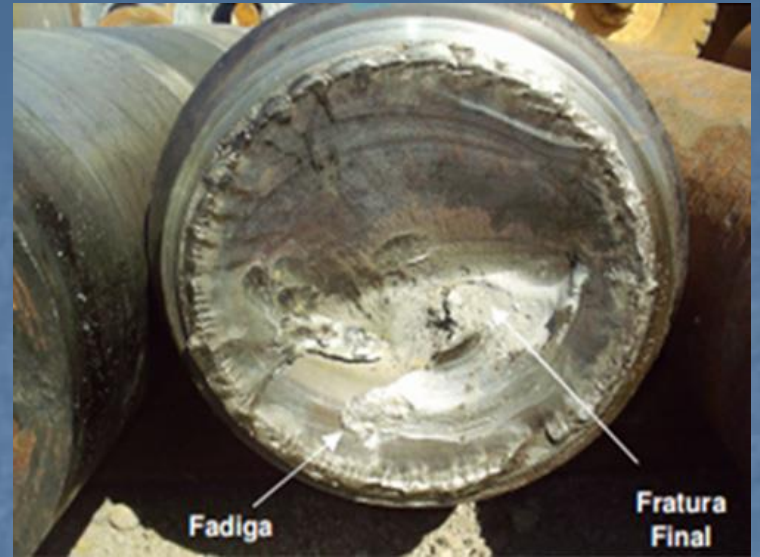
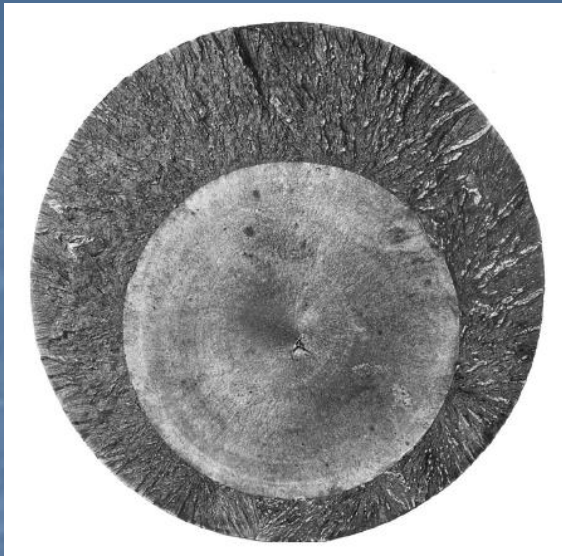
### ➤ Bach em 1908 separou as solicitações em

- Estáticas
- Alternadas simétricas
- Flutuantes

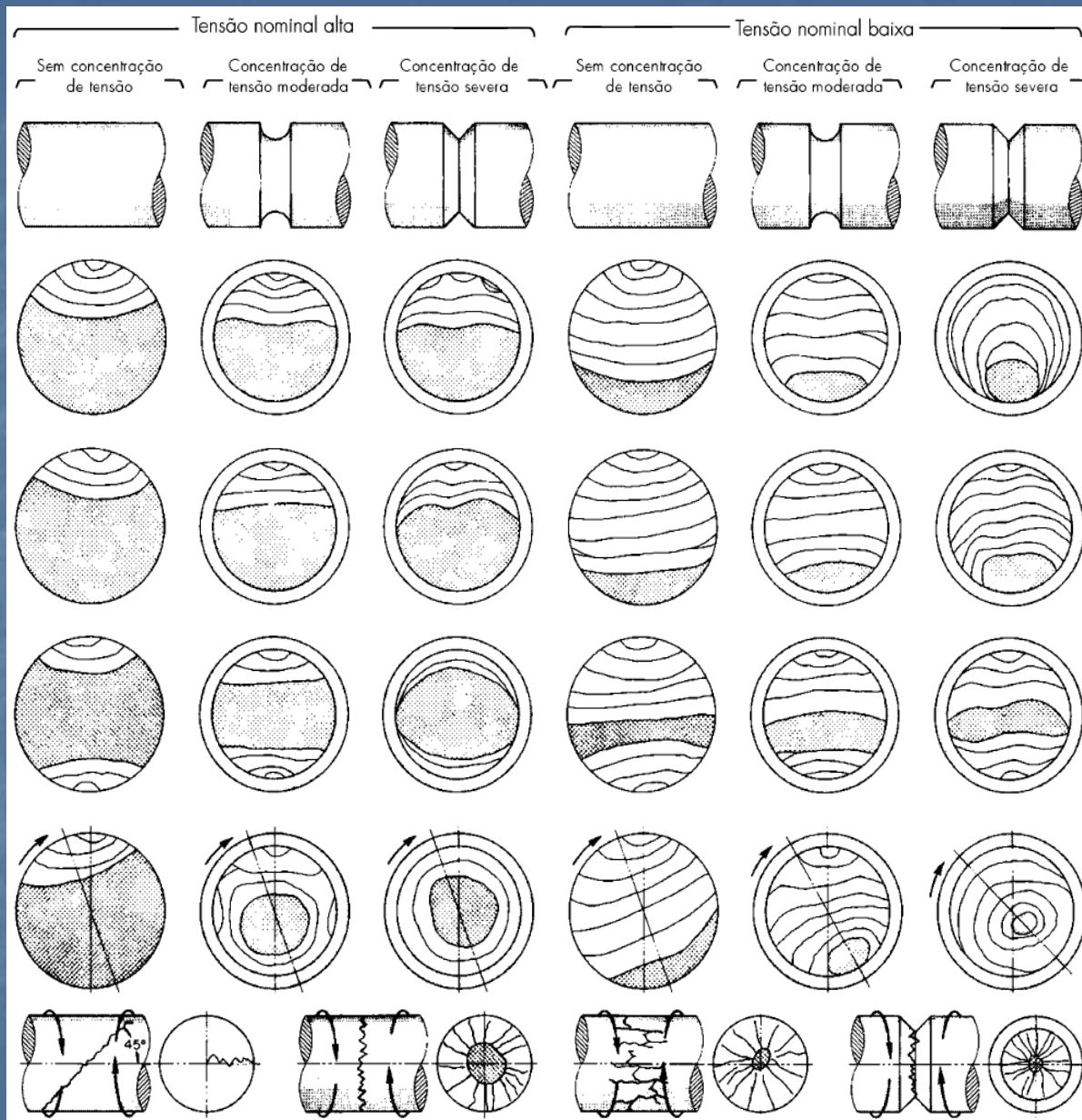
- Falha por fadiga





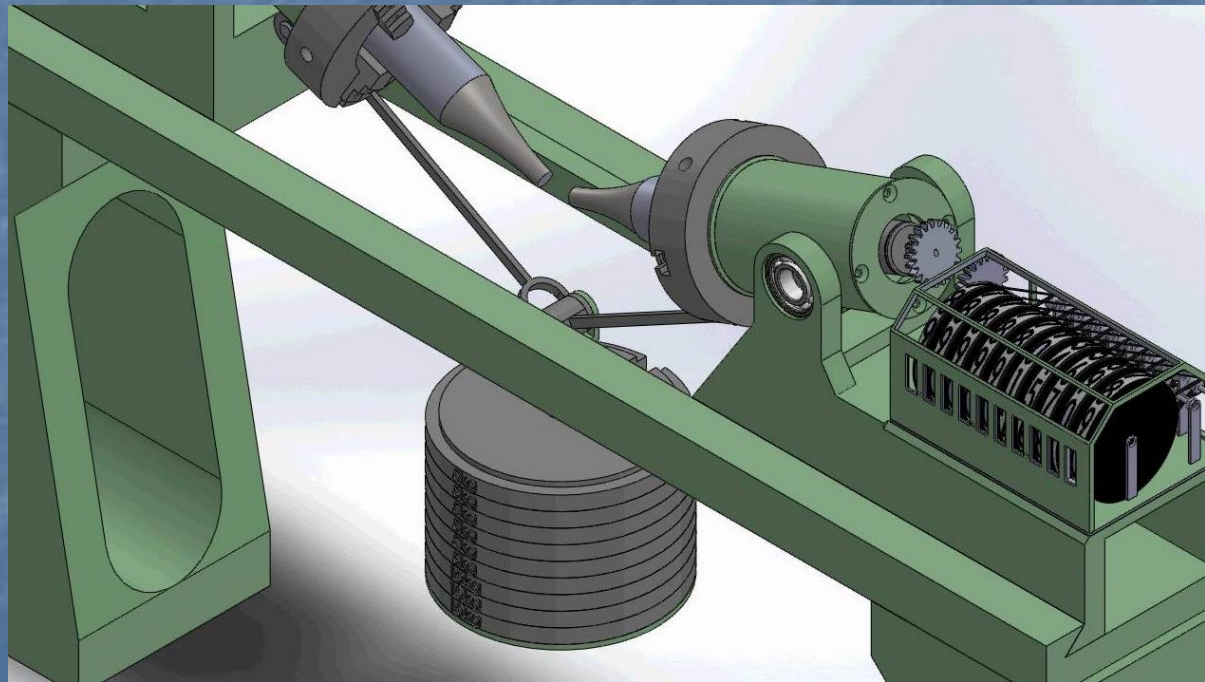
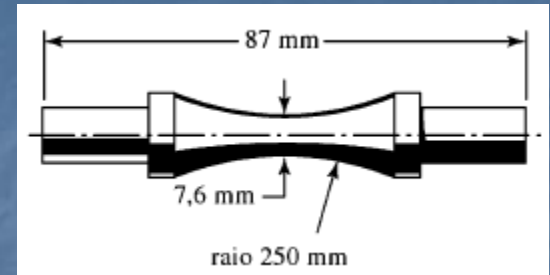


# PERFIS DE SUPERFÍCIES DE FRATURA POR FADIGA





## 2. Método da Tensão-Vida



# ■ Diagrama de Wohler ou diagrama S-N

$$S'_{f 10^3} = f \times S_{ut}$$

f pode ser encontrado na figura da página seguinte

$$S'_f = aN^b$$

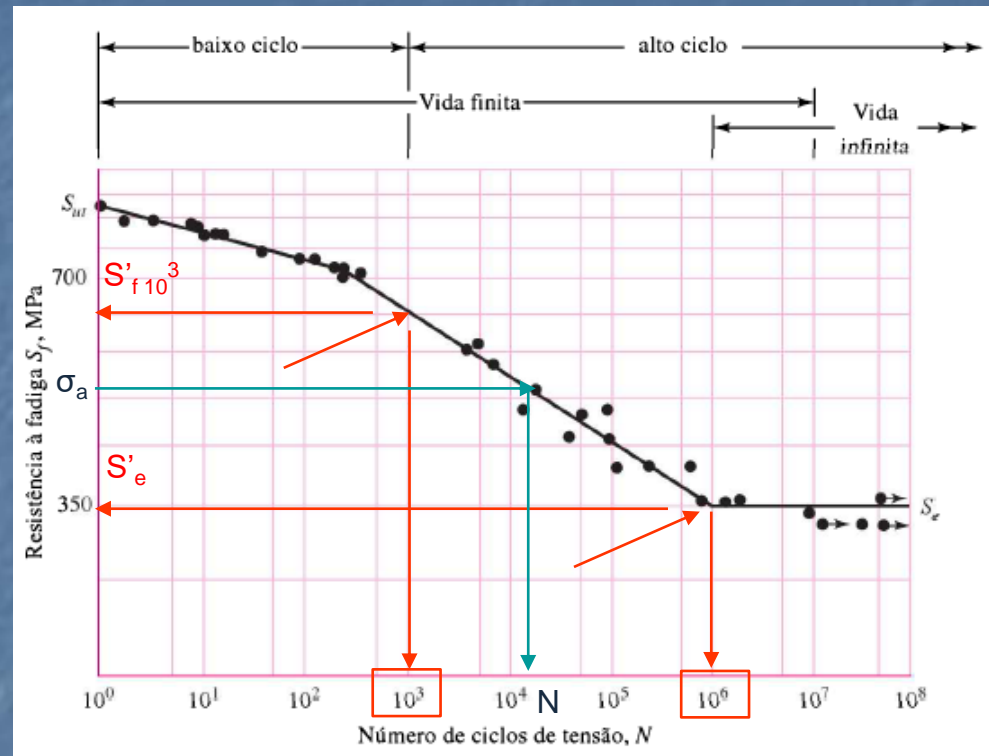
$$a = \frac{(fS_{ut})^2}{S'_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{fS_{ut}}{S'_e} \right)$$

$$S'_f \geq S_{ut} N^{\frac{\log f}{3}} \quad 1 \leq N \leq 10^3$$

$$N = \left( \frac{\sigma_a}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Número de ciclos até a falha para uma tensão  $\sigma_a$  completamente reversa



Aço G4130 normalizado

$S'_e$  = limite de resistência à fadiga (N = 10<sup>6</sup> a 10<sup>7</sup> ciclos para aços)

OBS.: A notação ' significa que o valor corresponde a um ensaio, não à peça real, i.e., sem os fatores de Marin.

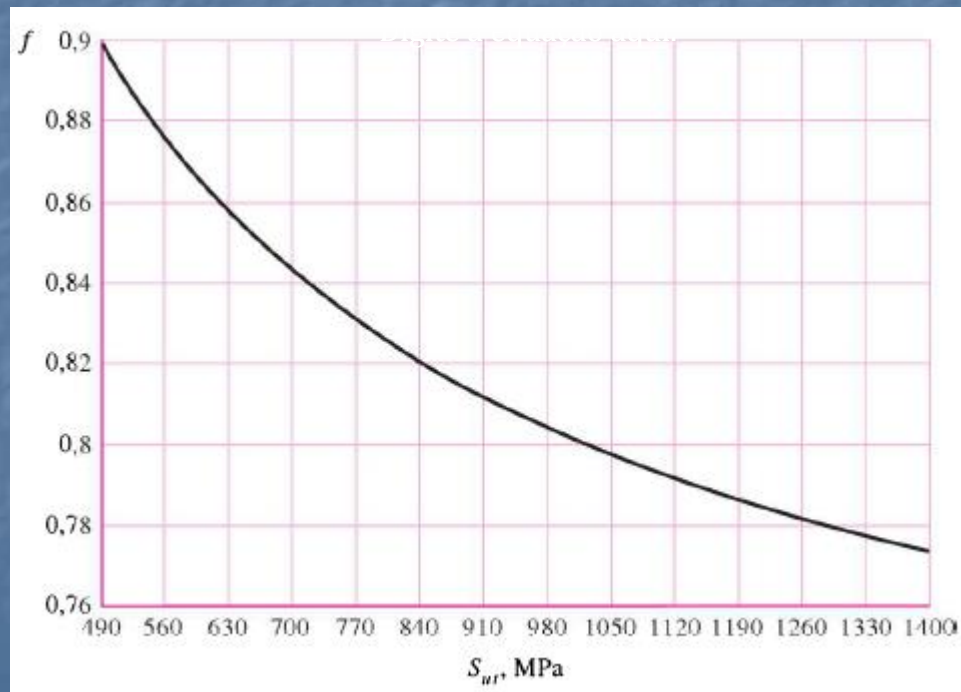
Valores de  $S'_e$  para o ferro fundido veja a Tabela A-22  
Do Shigley

$S'_e = 0,5 S_{ut}$  para aços com  $S_{ut} \leq 1400$  MPa

(Ver figura da página 9)

$S'_e = 700$  MPa para aços com  $S_{ut} > 1400$  MPa

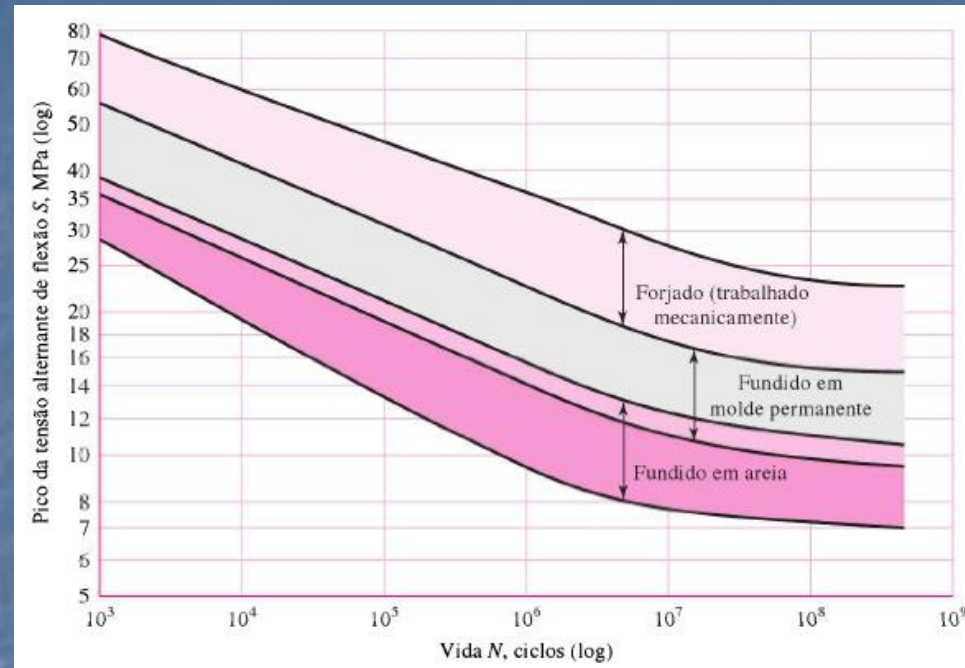
Valores estimados de  $f$



$$S'_f 10^3 = f \times S_{ut}$$



# Materiais não ferrosos – Não há vida infinita

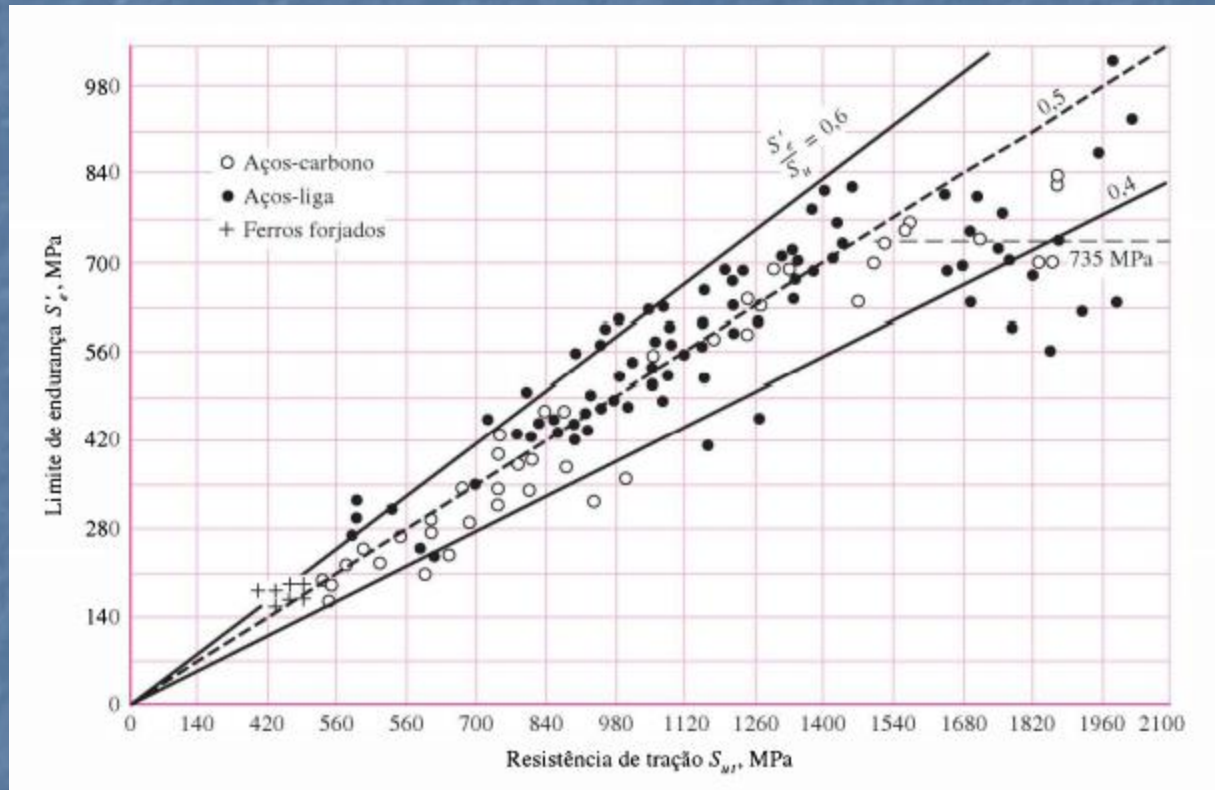


Alumínio

Valores indicativos na falta de dados específicos :

$$S'_f \text{ (N = } 5 \cdot 10^8 \text{ ciclos para metais não ferrosos)} \begin{cases} S'_f \cong 0,3 \text{ a } 0,4 S_{ut} & \left\{ \begin{array}{l} Al \text{ e ligas (para Al, veja também a Tabela A-22)} \\ Cu \text{ e ligas} \\ Mg \end{array} \right. \\ S'_f \cong 0,18 \text{ a } 0,3 S_{ut} & \text{Plásticos} \end{cases}$$

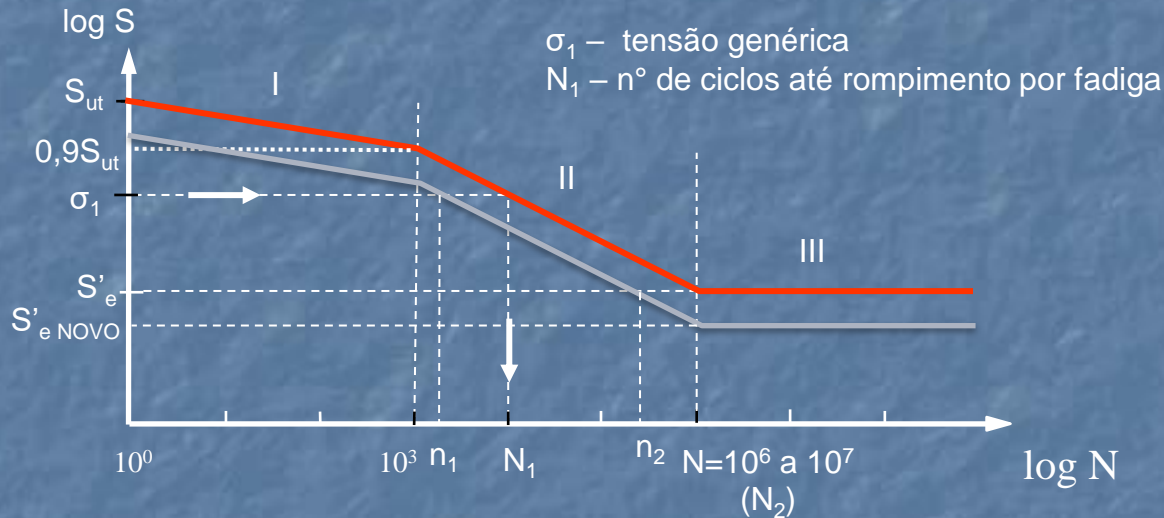
# Limite de fadiga para aços



# ■ Danos acumulativos

## Diagrama S-N

- I – Região de fadiga a baixa ciclagem
- II – Região de fadiga a alta ciclagem
- III – Região de vida infinita



Teorema de Miner

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1$$

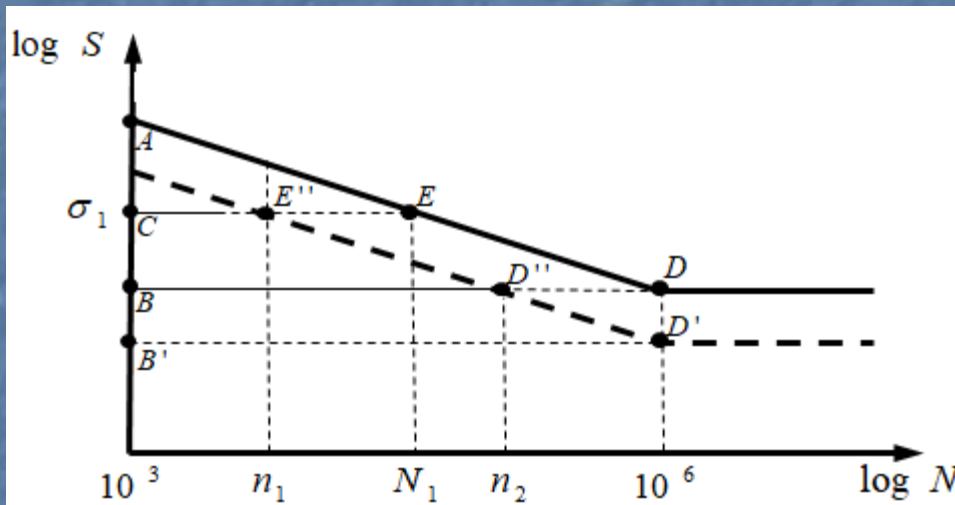
$$\frac{\log N_1 - \log 10^3}{\log(0,9S_{ut}) - \log \sigma_1} = \frac{\log 10^6 - \log 10^3}{\log(0,9S_{ut}) - \log S'_e}$$

$$\frac{\log 10^6 - \log n_2}{\log(S'_e) - \log \sigma_{e\ NOVO}} = \frac{\log 10^6 - \log 10^3}{\log(0,9S_{ut}) - \log S'_e}$$



**Exemplo:** Se  $S_{ut}=550$  MPa e  $S_e=276$  MPa e a peça for submetida à tensão  $\sigma_1=413$  MPa por  $n_1=3000$  ciclos,

- Se a tensão  $\sigma_1=413$  MPa persistir, quantos ciclos ainda restam até a ruptura por fadiga?
- Qual o novo limite de fadiga  $S_{e\text{NOVO}}$ ?



$$\Delta ACE \sim \Delta ABD$$

$$\frac{\log N_1 - \log 10^3}{\log(0,9S_{ut}) - \log \sigma_1} = \frac{\log 10^6 - \log 10^3}{\log(0,9S_{ut}) - \log S'_e}$$

$$\Delta DD'D'' \sim \Delta ABD$$

$$\frac{\log 10^6 - \log n_2}{\log(S'_e) - \log \sigma_{e\text{NOVO}}} = \frac{\log 10^6 - \log 10^3}{\log(0,9S_{ut}) - \log S'_e}$$

$$\frac{\log N_1 - \log 10^3}{\log(0,95 \text{ u}) - \log(0,1)} = \frac{\log(10^6) - \log(10^3)}{\log(0,95 \text{ u}) - \log(5'e)}$$

$$\frac{\log N_1 - 3}{\log(0,9 \times 550) - \log(413)} = \frac{6 - 3}{\log(0,9 \times 550) - \log(276)}$$

$$\log N_1 = 3,93007$$

$$N_1 = 8513 \text{ ciclos}$$

a)  $\sigma_1$  durante  $3 \times 10^3$  ciclos

$$N_1 = 8.513 \text{ ciclos}$$

$$\Delta = 8.513 - 3.000 = 5.510 \text{ ciclos}$$

b) usando Miner:  $\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \Rightarrow \frac{3,0 \times 10^3}{8,5 \times 10^3} + \frac{n_2}{10^6} \Rightarrow$   
 $n_2 = 6,5 \times 10^5 \text{ ciclos} \Rightarrow$

$$\frac{\log 10^6 - \log (6,5 \times 10^5)}{\log (s'e) - \log s'e_{\text{NOVO}}} = \frac{\log (10^6) - \log (10^3)}{\log (0,9 s_{\text{ut}}) - \log (s'e)}$$

$$\frac{6 - \log (6,5 \times 10^5)}{\log (276) - \log (s'e_{\text{NOVO}})} = \frac{6 - 3}{\log (0,9 \times 550) - \log (276)}$$

$$\log s'e_{\text{NOVO}} = 1,424881$$

$$\underline{s'e_{\text{NOVO}} = 266 \text{ MPa}}$$

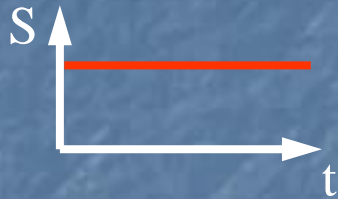


# 2. Tipos de variação de tensão

Coeficiente de variação de solicitação

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

## ■ Contínua



$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

Tensão alternante  $\sigma_a$

Tensão média  $\sigma_m$

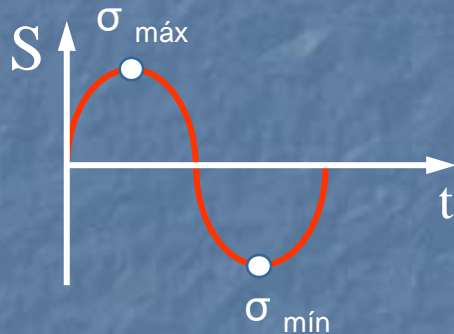
0

0

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

$$K = 1$$

## ■ Alternada simétrica



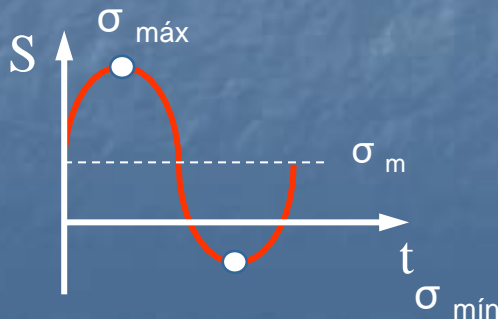
$$A = \infty$$

$\sigma_{\text{máx}}$

$$\sigma_m = 0$$

$$K = \infty$$

## ■ Alternada



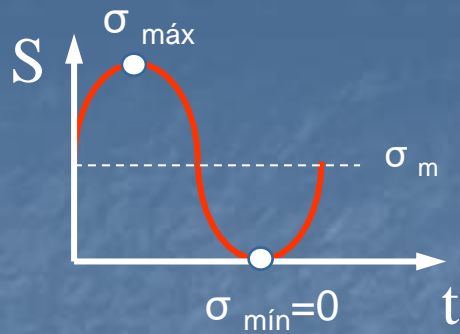
$$1 < A < \infty$$

$$\frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2}$$

$$\frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2}$$

$$2 < K < \infty$$

## ■ Pulsatória



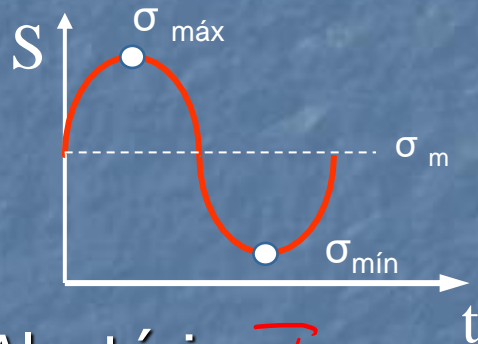
$$A = 1$$

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{2}$$

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{2}$$

$$K = 2$$

## ■ Pulsatória ondulada



$$0 < A < 1$$

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$1 < K < 2$$

## ■ Aleatória



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

$$\sigma_M = \text{m\acute{a}x}(|\sigma_{m\acute{a}x}|, |\sigma_{m\acute{i}n}|)$$

### Exemplo



$$\sigma_M = \max[|\sigma_{\max}|, |\sigma_{\min}|] = \max[|-2|, |-10|] = 10$$

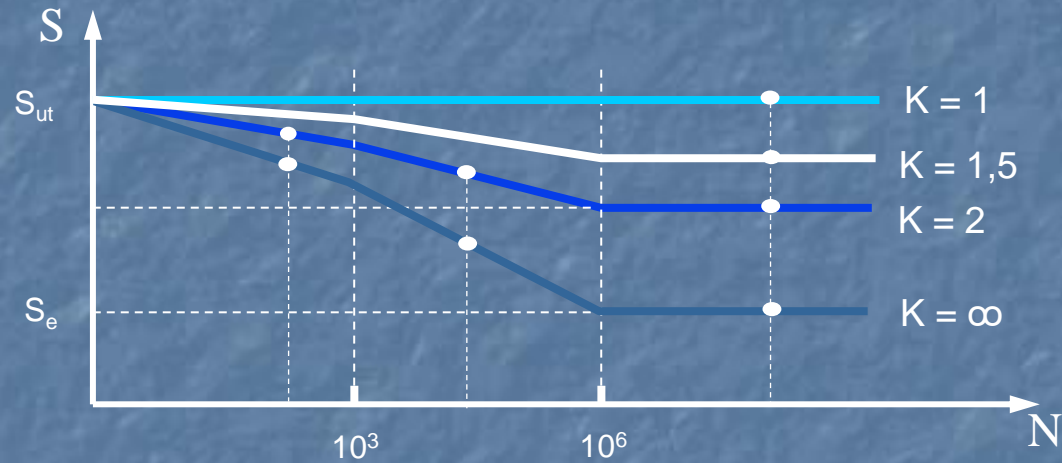
$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{-4}{-6} = 0,67$$

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

$$k = \frac{\sigma_M}{\sigma_m} = \frac{10}{|-6|} = 1,67$$



# Diagrama S-N para diferentes valores de K



# 3. Critérios de falha por fadiga para tensão flutuante

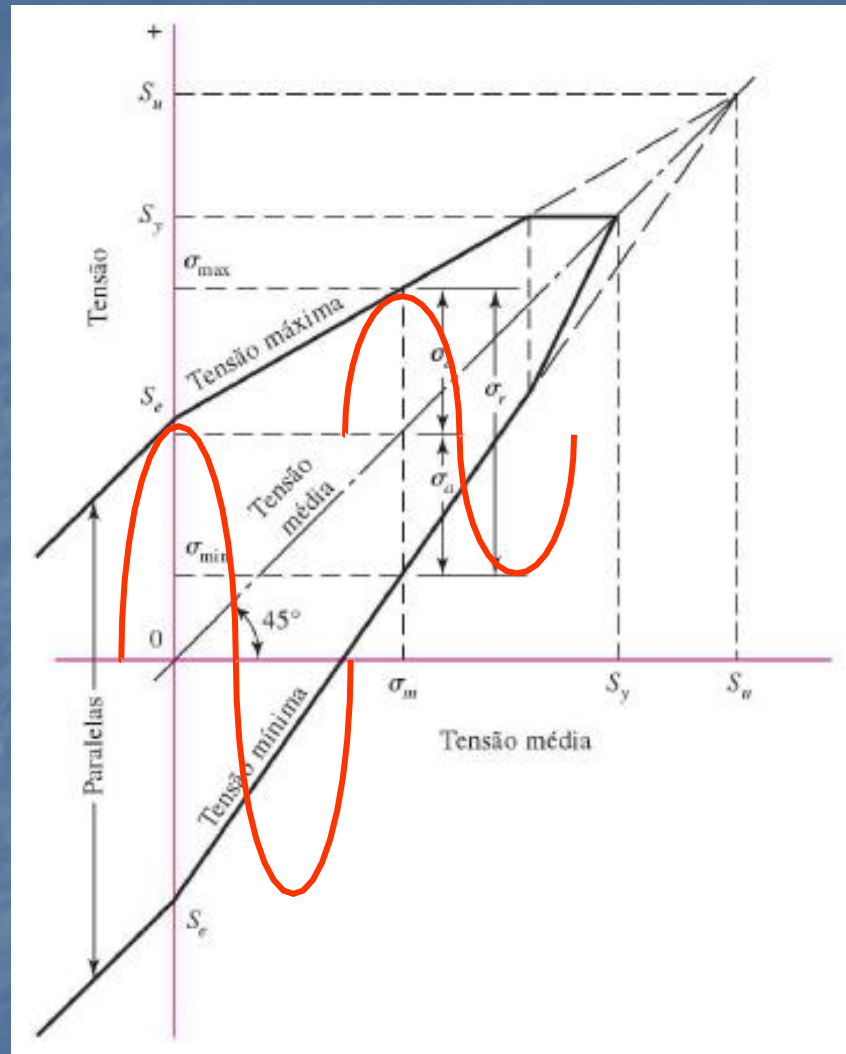


Diagrama de Goodman modificado  
Extraído de Shigley. Figura 6.24

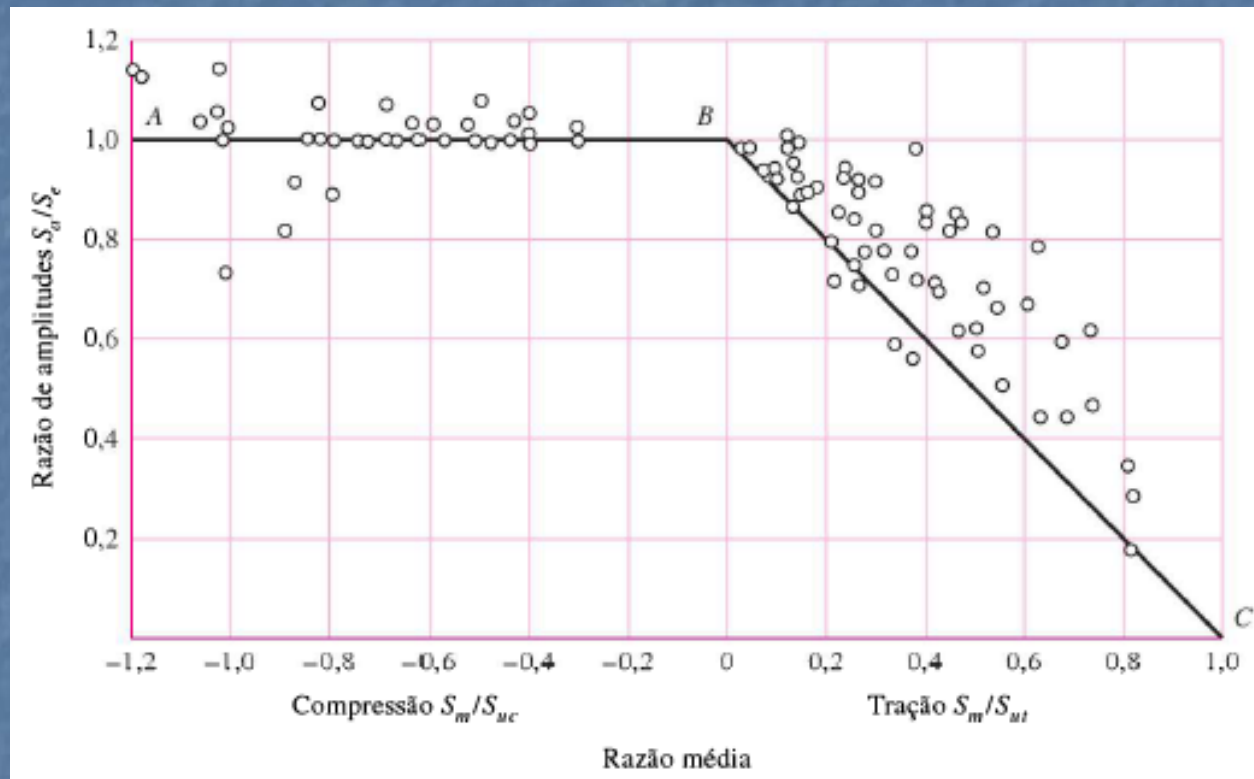
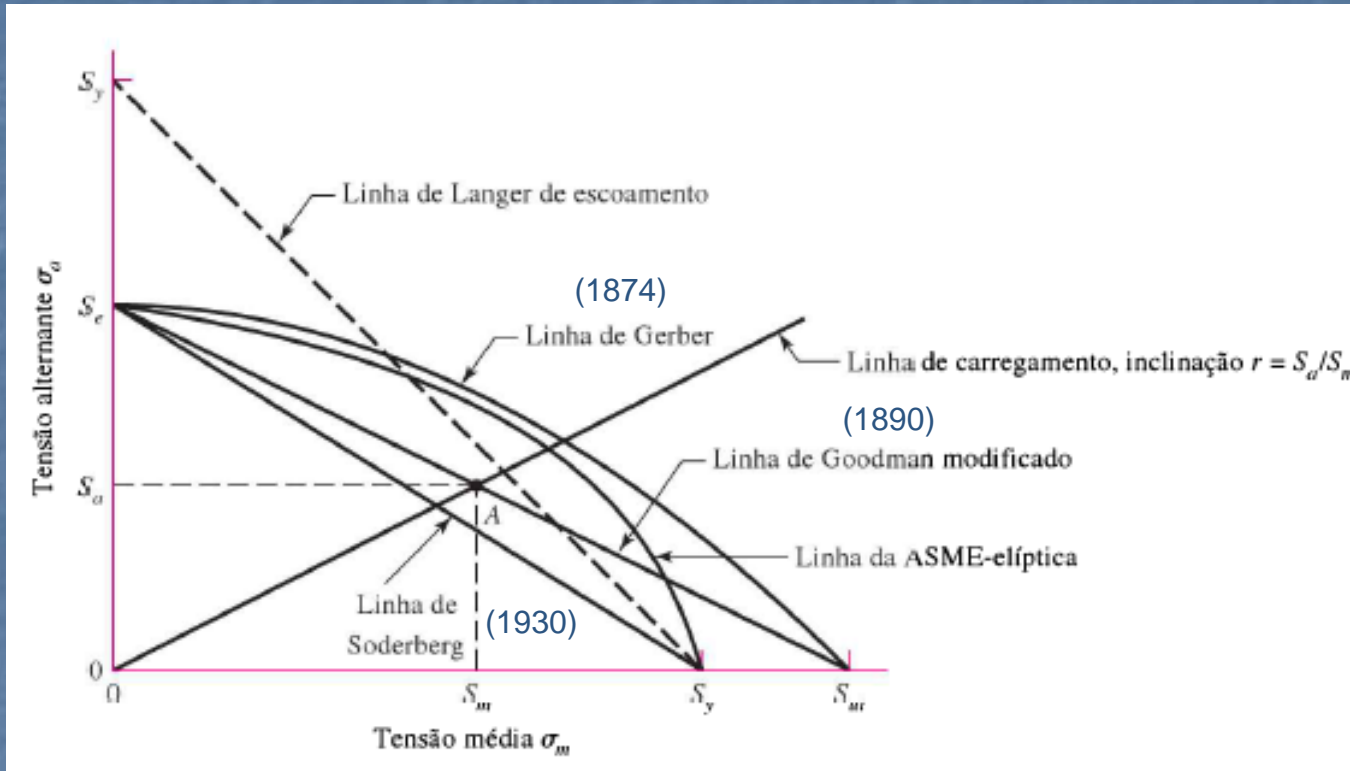


Gráfico de falha por fadiga por tensões médias  
 Extraído de Shigley. Figura 6.25



$S_{ut}$  = Resistência máxima a tração  
 $S_{yt}$  = Resistência ao escoamento  
 $S_m$  = Resistência média  
 $S_a$  = Resistência alternante



Vários critérios de falha por fadiga  
 Extraído de Shigley. Figura 6.26

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  $\sigma_m$  correspondente à resistência  $S_a$ ; que, emparelhada com  $\sigma_m$ , é o valor limite de  $\sigma_a$ .

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

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

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

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

$S_e$  = Limite de fadiga com média zero  
 $S_{yt}$  = tensão de escoamento  
 $S_m$  = resistência média  
 $S_a$  = resistência alternante  
 $\sigma_a$  = limite de fadiga com tensão diferente de zero  
 $\sigma_m$  = tensão média

As tensões  $n_f \sigma_a$  e  $n_f \sigma_m$  podem substituir  $S_a$  e  $S_m$ , sendo  $n_f$  o fator de segurança contra fadiga para vida infinita

## 4. Fatores que influenciam na resistência à fadiga – Fatores de Marin

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

$k_a$  = fator de modificação de condição de superfície

$k_b$  = fator de modificação de tamanho

$k_c$  = fator de modificação de carga

$k_d$  = fator de modificação de temperatura

$k_e$  = fator de modificação de confiabilidade

$k_f$  = fator de modificação por efeitos variados

$S'_e$  = limite de resistência à fadiga do corpo de prova de barra rotativa

$S_e$  = limite de resistência à fadiga do componente real



## FATOR DE MODIFICAÇÃO DE CONDIÇÃO DE SUPERFÍCIE ( $k_a$ )

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

### Tabela 6-2

Parâmetros para o fator de modificação de superfície de Marin, Equação (6-19).

Acabamento superficial	Fator $a$ $S_{ut}$ , MPa	Expoente $b$
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Extraído de C. J. Noll e C. Lipson, "Allowable Working Stresses", *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3, n. 2, 1946, p. 29. Reproduzido por O. J. Horger (ed.) in *Metals Engineering Design ASME Handbook*, Nova York: McGraw-Hill. Copyright © 1953 by The McGraw-Hill Companies, Inc. Reimpresso com autorização.

## FATOR DE TAMANHO ( $k_b$ )

- Kugel : Diâmetro maior (maior volume de material) implica maior probabilidade de falha por fadiga.
- Von Philip : Material perto da LN ( $\sigma \cong 0$ ) "descarrega" trabalho das fibras externas  $\Rightarrow \sigma_{\max}$  real é menor que teórico. Para diâmetros grandes este efeito é pequeno.

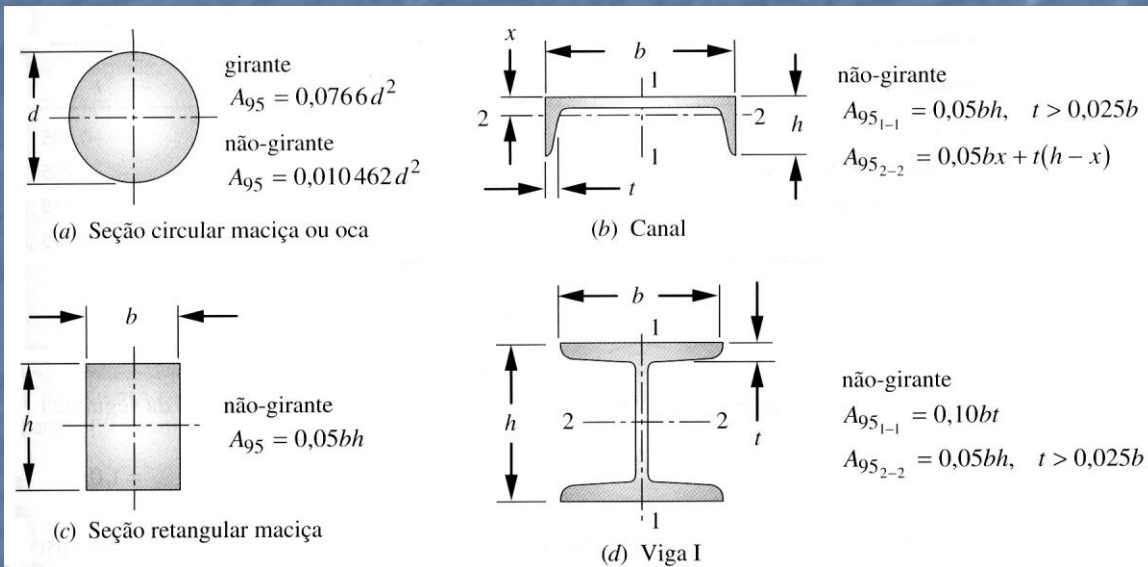
Para flexão e torção:

$$k_b = \begin{cases} \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51mm \\ 1,51d^{-0,157} & 51 < d \leq 254mm \end{cases}$$

Para carregamento axial:

$$k_b = 1$$

Para eixo não rotativo ou não circular:



$$d_{equiv} = \sqrt{\frac{A_{95}}{0,0766}}$$

No lugar de d, use  $d_{equiv}$



## FATOR DE CARREGAMENTO ( $k_c$ )

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexão} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torção} \end{cases}$$

## FATOR DE TEMPERATURA ( $k_d$ )

a) Quando se conhece  $S_{RT}$

**Tabela 6-4**

Efeito da temperatura de operação na resistência à tração do aço. \*  
( $S_T$  = resistência à tração na temperatura de operação;  
 $S_{RT}$  = resistência à tração à temperatura ambiente,  $0,099 \leq \hat{\sigma} \leq 0,110$ .)

Temperatura, °C	$S_T/S_{RT}$
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

\* Fonte de dados: Figura 2-9.

b) Quando se conhece  $S'_e$

$$k_d = 0,9877 + 0,6507(10^{-3})T_c - 0,3414(10^{-5})T_c^2 + 0,5621(10^{-8})T_c^3 - 6,246(10^{-12})T_c^4$$



## FATOR DE CONFIABILIDADE ( $k_e$ )

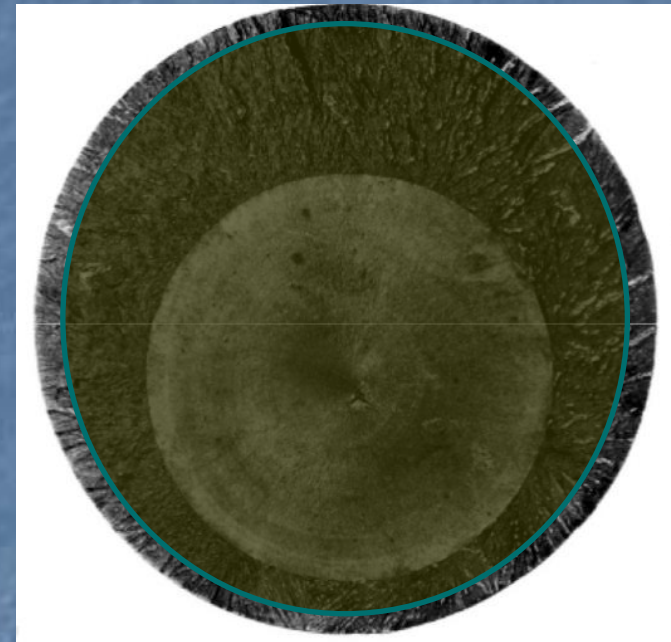
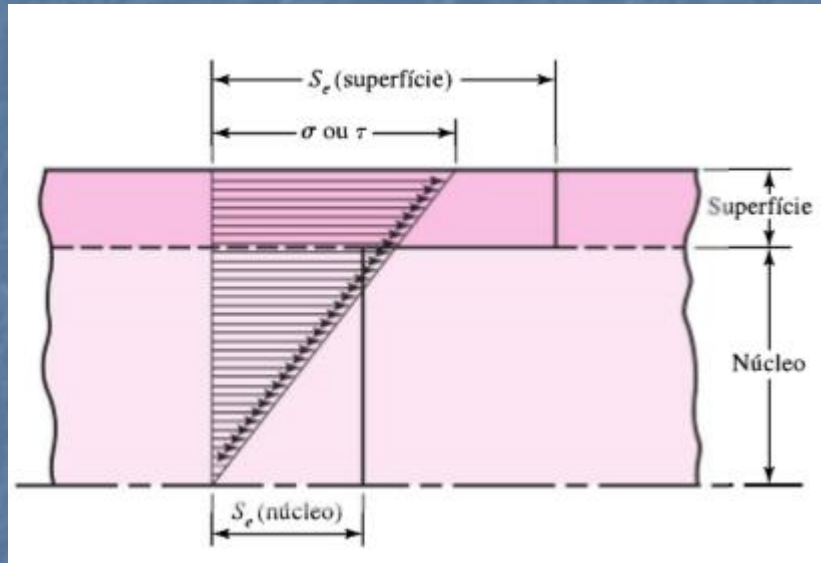
$$k_e = 1 - 0,08z_a$$

**Tabela 6-5**

Fatores de confiabilidade  $k_e$  correspondentes a 8% de desvio padrão do limite de endurance.

Confiabilidade, %	Variante de transformação $z_a$	Fator de confiabilidade $k_e$
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

## FATOR DE EFEITOS DIVERSOS ( $k_f$ )



Corrosão, cromação, niquelação, recobrimento com cádmio, pulverização de metal e *fretting*

# 5. Fator de concentração de tensão e sensibilidade ao entalhe

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

ou

$$K_{fs} = 1 + q_{cisalham}(K_{ts} - 1)$$

$K_f$  – Fator de concentração de tensão à fadiga

$K_t$  – Fator de concentração de tensão estático (TAB. A-13)

$q$  – Sensibilidade ao entalhe (Fig 6-20 ou 6-21)

$q = 0,2$  para todos os ferros fundidos

Equação de Neuber

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

Tipo de entalhe	$\frac{\sqrt{a}(\sqrt{\text{mm}})}{S_{uf} \text{ em MPa}}$
Furo transversal	$174/S_{uf}$
Ressalto	$139/S_{uf}$
Fenda	$104/S_{uf}$

TAB. 6-15 (adaptada do Shigley)

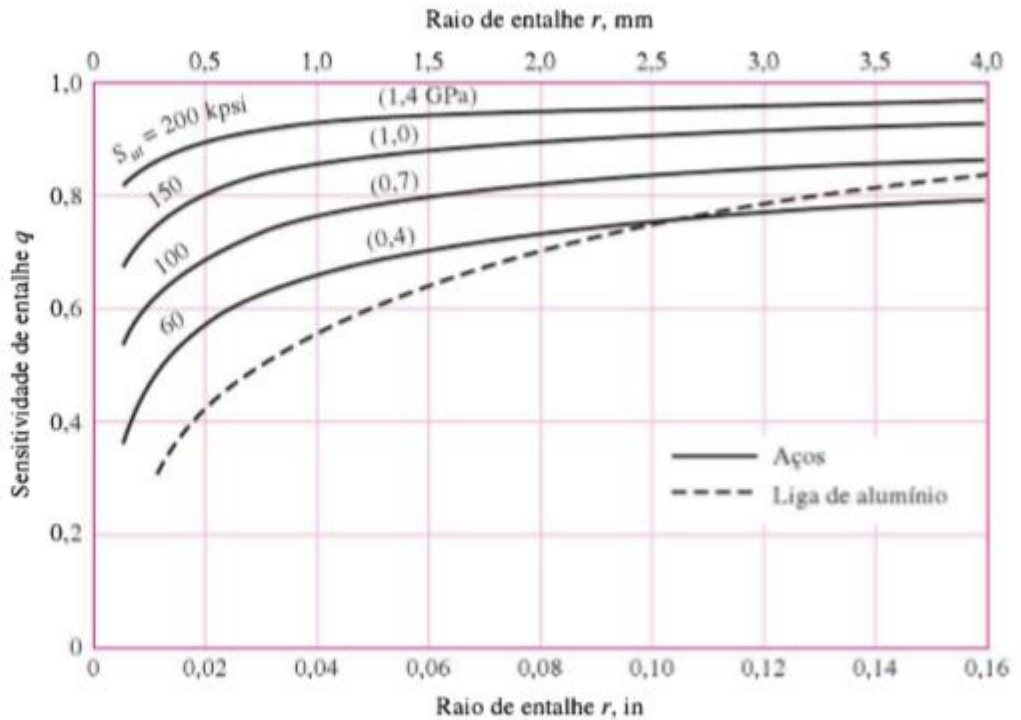
Na dúvida use  $K_f = K_t$

## Figura 6-20

Cartas de sensibilidade ao entalhe de aços e ligas de alumínio forjado UNS A92024-T submetidas à flexão reversa ou cargas axiais reversas. Para raios de entalhe maiores, utilize os valores de  $q$  correspondentes à ordenada  $r = 0,16$  in (4 mm).

(Extraído de George Sines e J. L. Waisman (eds.), *Metal Fatigue*, McGraw-Hill, New York.

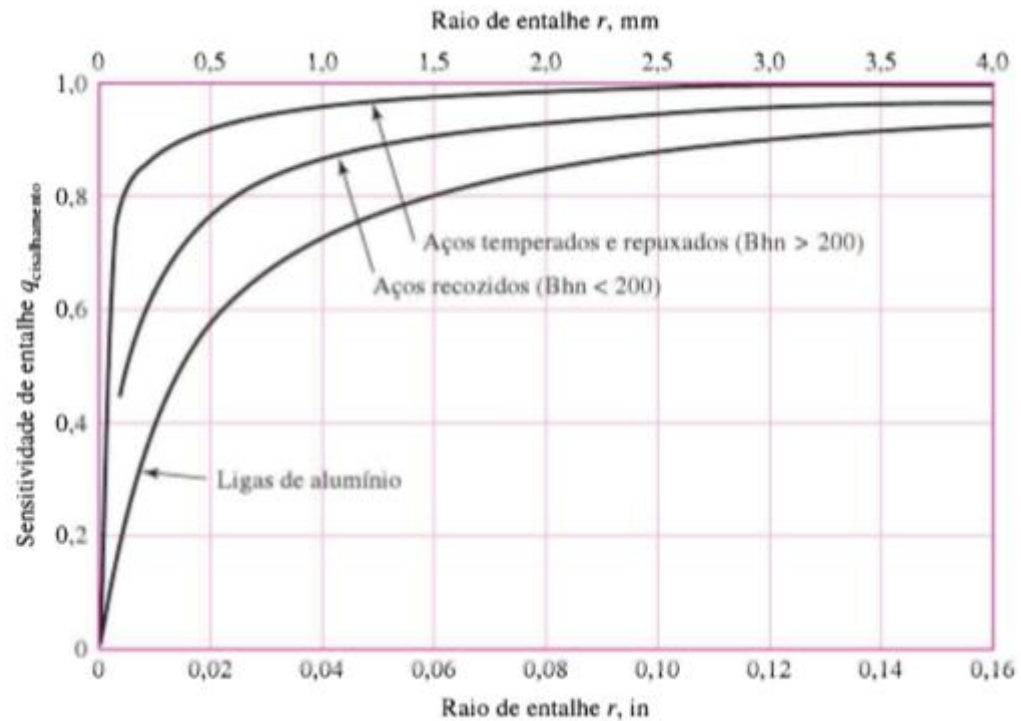
Copyright © 1969, The McGraw-Hill Companies, Inc. Reimpresso com permissão.)





### Figura 6-21

Curvas de sensibilidade ao entalhe para materiais em torção reversa. Para raios grandes de entalhe, use valores de  $q_{\text{cisalhamento}}$  correspondente a  $r = 0,16$  in (4 mm).



Como obter  $K_f$

a) obter  $K_f$  por ensaios diretos

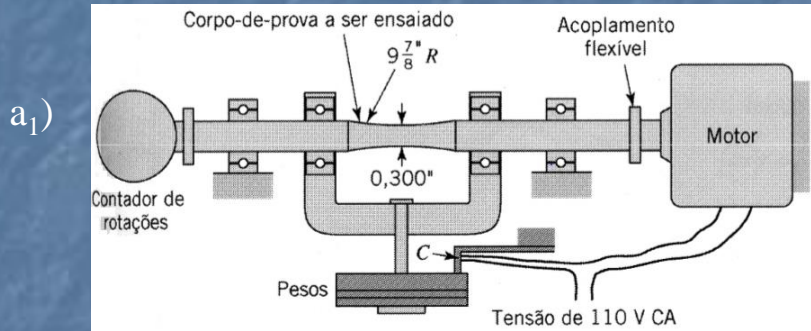


Diagrama SN  $\rightarrow S'_e$  sem entalhe

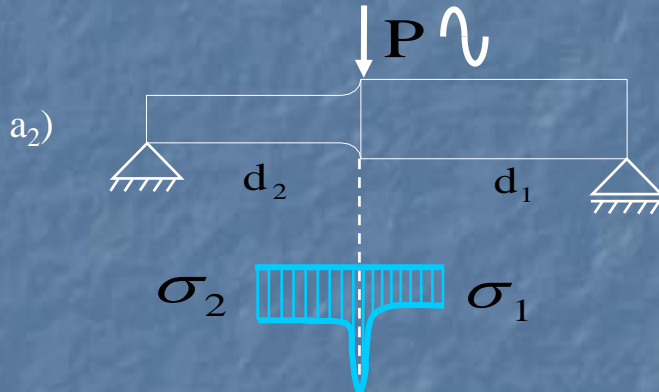


Diagrama SN  $\rightarrow S'_e$  com entalhe

$$K_f = \frac{S'_e \text{ sem entalhe}}{S'_e \text{ com entalhe}}$$

b) obter  $K_t$  por gráficos disponíveis (retirados da Tabela A-13 do Shigley)

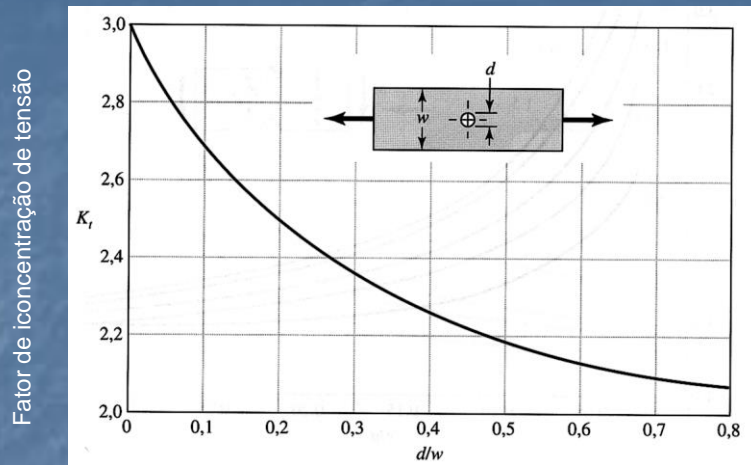


Figura 1 - Fator de concentração de tensão para uma barra retangular sujeita à tração ou compressão com um furo transversal

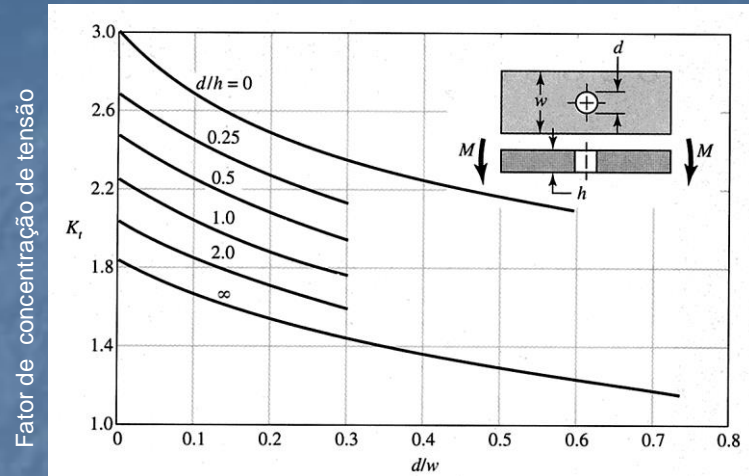


Figura 2 - Fator de concentração de tensão para uma barra retangular sujeita à flexão com um furo transversal

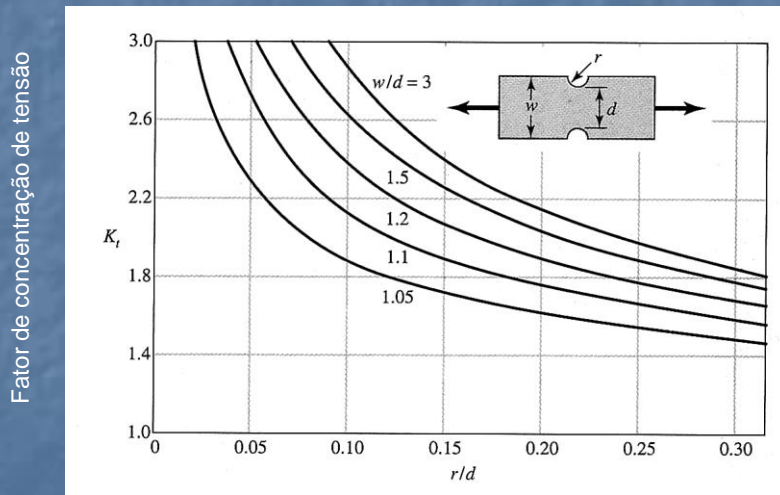


Figura 3 - Fator de concentração de tensão para uma barra com entalhes, sujeita a tração e compressão

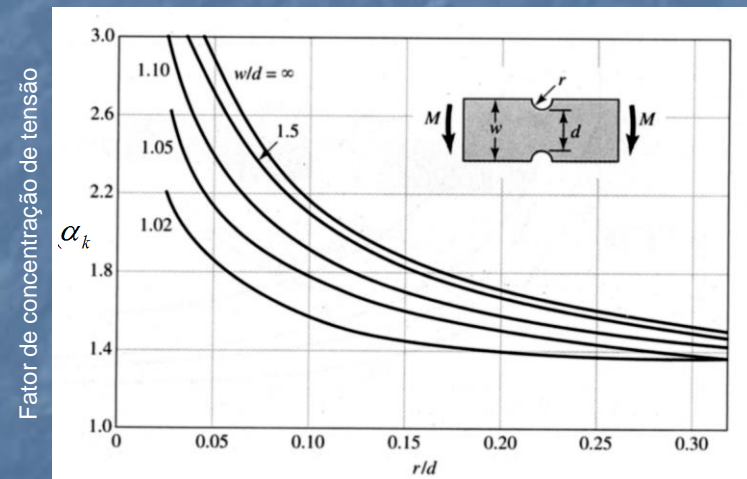


Figura 4 - Fator de concentração de tensão para uma barra retangular sujeita à flexão

Fator de concentração de tensão

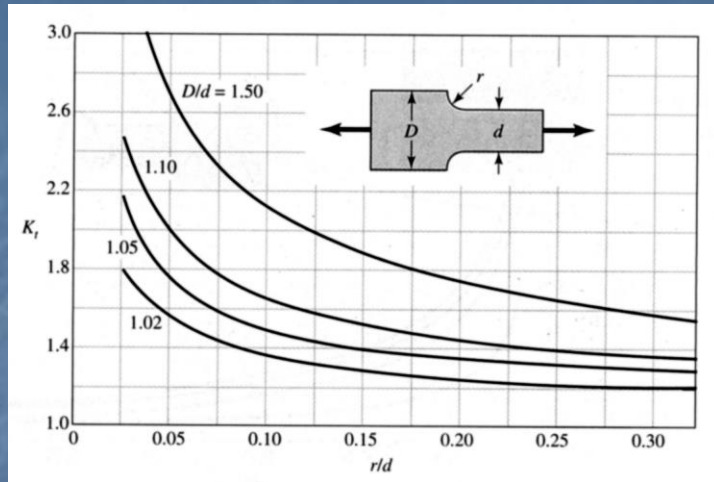


Figura 5 - Fator de concentração de tensão para uma barra com variação de secção sujeita a tração e compressão.

Fator de concentração de tensão

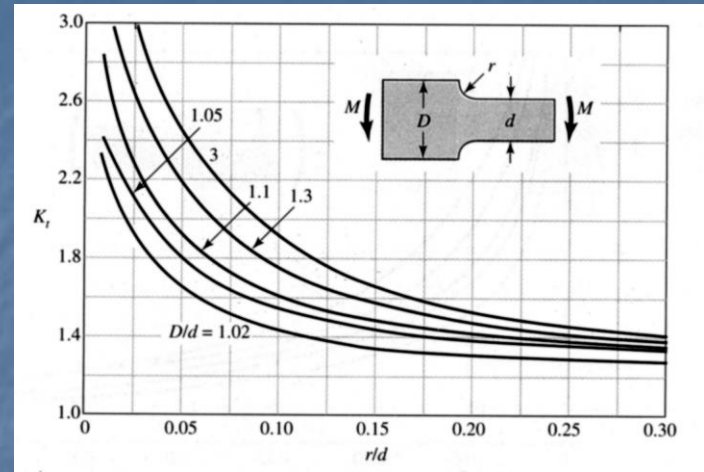


Figura 6 - Fator de concentração de tensão para uma barra com variação de secção sujeita a flexão.

Fonte: Shigley, J. E. et al. *Mechanical Engineering Design*. 7th ed. 2004 (appud Peterson, R.E. Design Factors for Stress Concentration, Parts 1 to 5 *Machine Design*, Feb-Jul. 1951. )



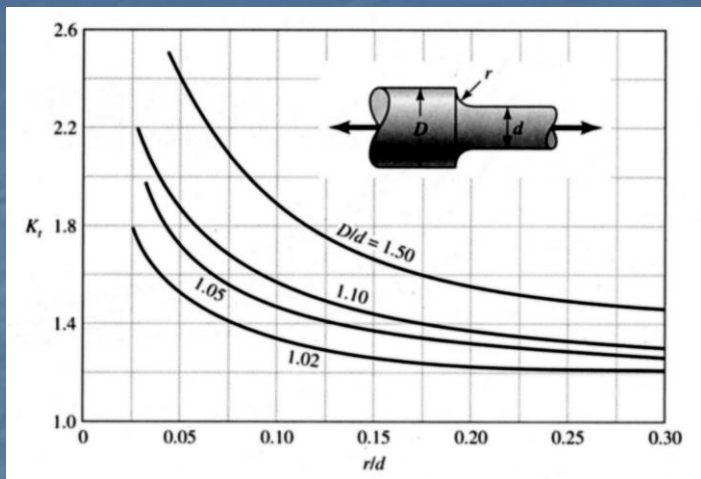


Figura 7 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular sujeito a tração

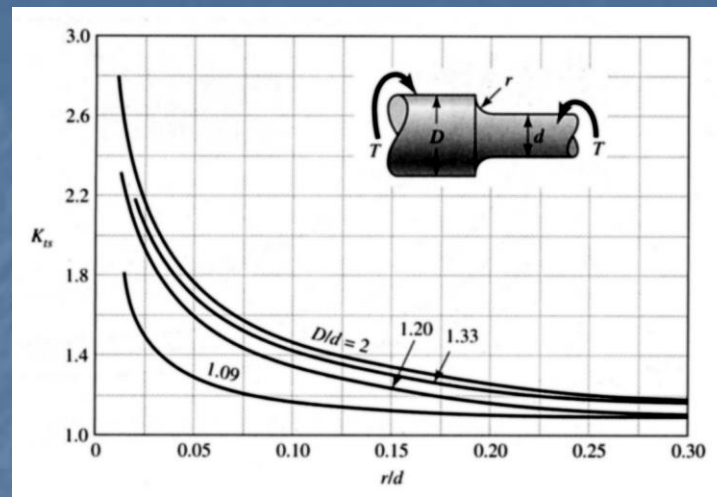


Figura 8 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular sujeito a torção

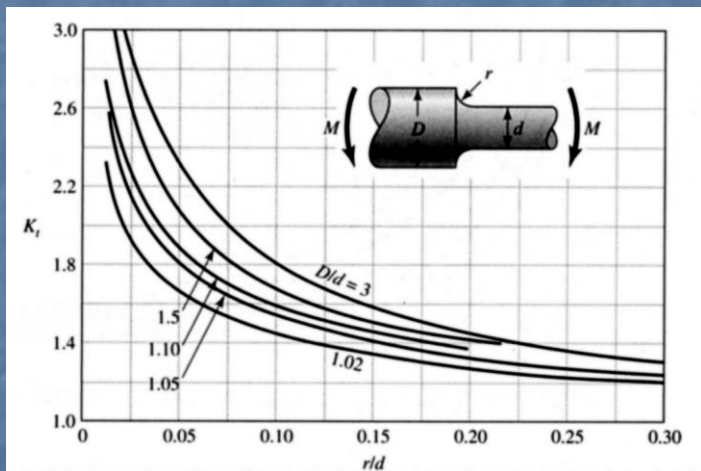


Figura 9 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular sujeito à flexão

Fonte: Shigley, J. E. et al. *Mechanical Engineering Design*. 7th ed. 2004 (appud Peterson, R.E. *Design Factors for Stress Concentration*, Parts 1 to 5 *Machine Design*, Feb-Jul. 1951. )

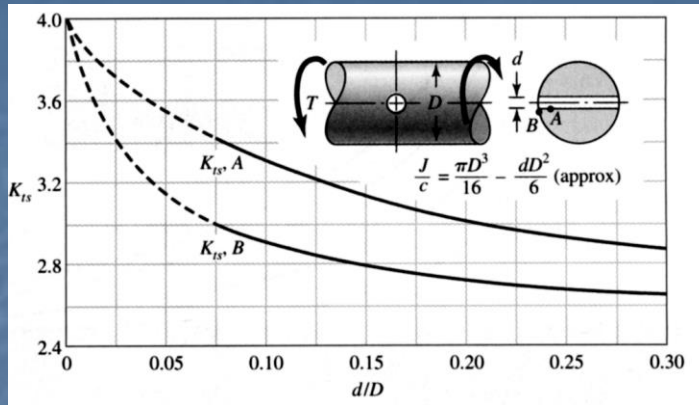


Figura 10 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com um furo, sujeito à flexão

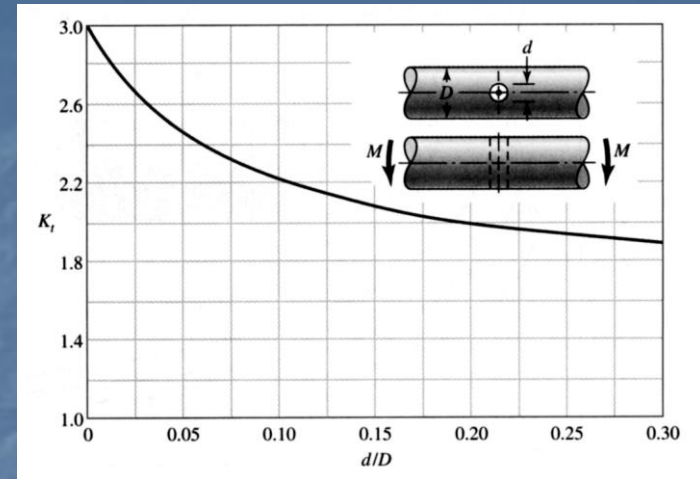


Figura 11 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com um furo, sujeito à torção

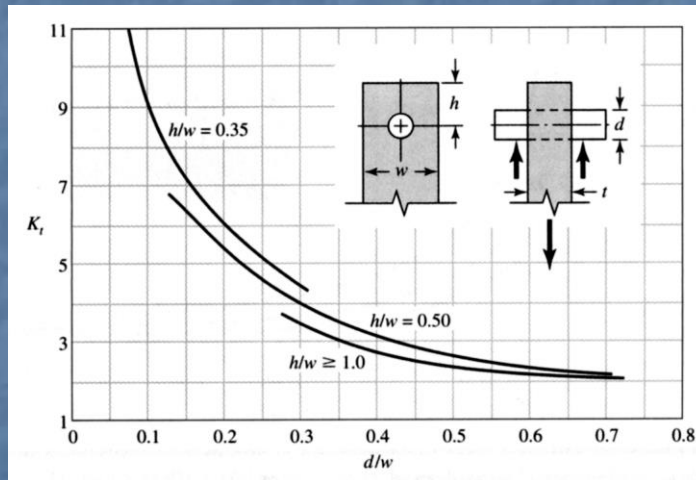


Figura 12 - Fator de concentração uma barra sujeita a tração através de um pino.

Fonte: Shigley, J. E. et al. *Mechanical Engineering Design*. 7th ed. 2004 (appud Peterson, R.E. Design Factors for Stress Concentration, Parts 1 to 5 *Machine Design*, Feb-Jul. 1951. )

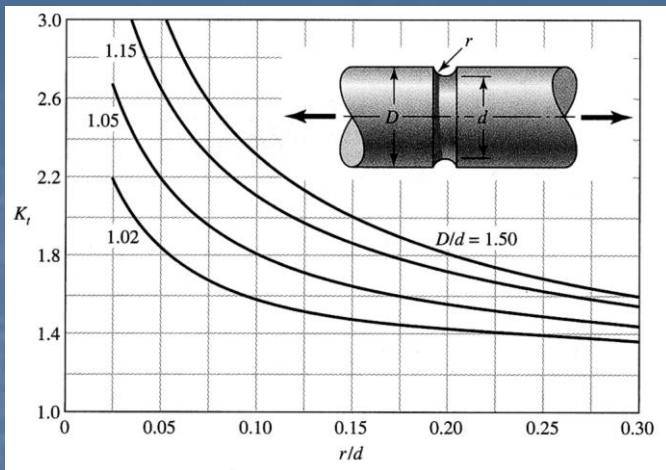


Figura 13 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com um rasgo arredondado, sujeito à tração.

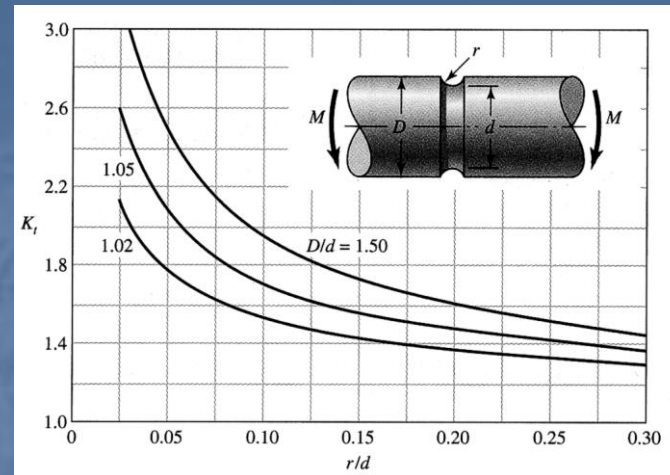


Figura 14 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com rasgo arredondado, sujeito à flexão.

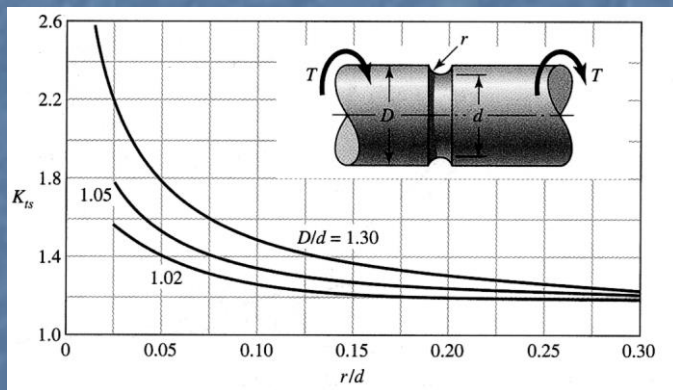


Figura 15 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com rasgo arredondado, sujeito à torção.

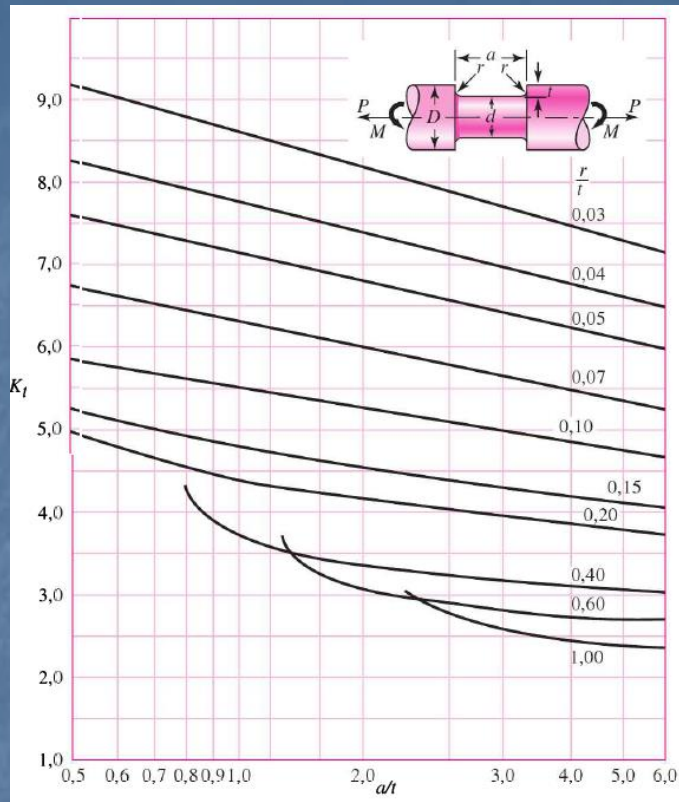


Figura 16 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com rasgo cilíndrico, sujeito à tração e/ou flexão.

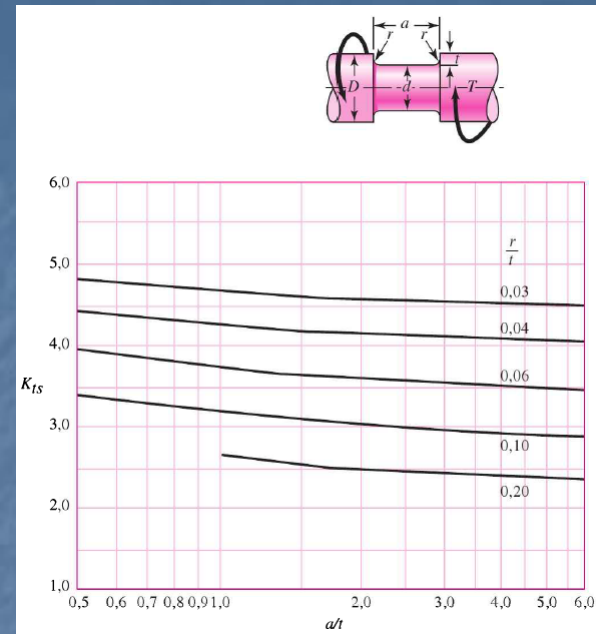
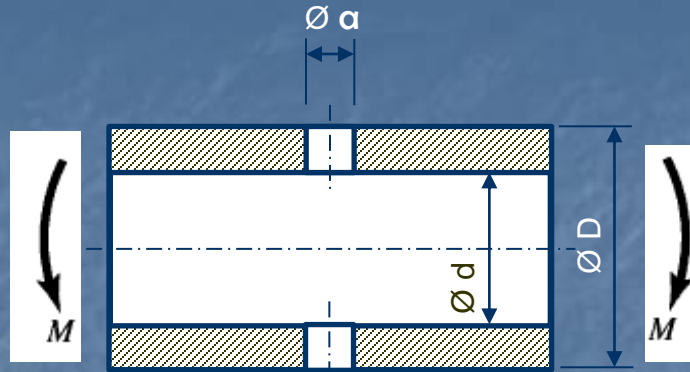


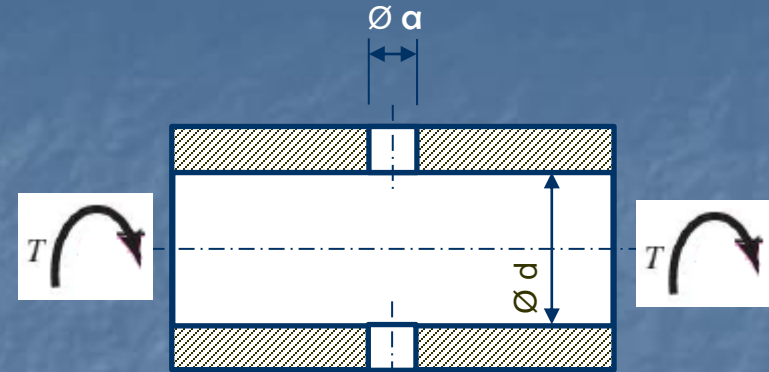
Figura 17 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com rasgo cilíndrico, sujeito à torção.





a/D	d/D					
	0,9		0,6		0	
	A	K <sub>t</sub>	A	K <sub>t</sub>	A	K <sub>t</sub>
0,050	0,92	2,63	0,91	2,55	0,88	2,42
0,075	0,89	2,55	0,88	2,43	0,86	2,35
0,10	0,86	2,49	0,85	2,36	0,83	2,27
0,125	0,82	2,41	0,82	2,32	0,80	2,20
0,15	0,79	2,39	0,79	2,29	0,76	2,15
0,175	0,76	2,38	0,75	2,26	0,72	2,10
0,20	0,73	2,39	0,72	2,23	0,68	2,07
0,225	0,69	2,40	0,68	2,21	0,65	2,04
0,25	0,67	2,42	0,64	2,18	0,61	2,00
0,275	0,66	2,48	0,61	2,16	0,58	1,97
0,30	0,64	2,52	0,58	2,14	0,54	1,94

Figura 17 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, cheio ou vazado com furo cilíndrico transversal, sujeito à tração e/ou flexão.



a/D	d/D									
	0,9		0,8		0,6		0,4		0	
	A	K <sub>ts</sub>	A	K <sub>ts</sub>	A	K <sub>ts</sub>	A	K <sub>ts</sub>	A	K <sub>ts</sub>
0,05	0,96	1,78							0,95	1,77
0,075	0,95	1,82							0,93	1,71
0,10	0,94	1,76	0,93	1,74	0,92	1,72	0,92	1,70	0,92	1,68
0,125	0,91	1,76	0,91	1,74	0,90	1,70	0,90	1,67	0,89	1,64
0,15	0,90	1,77	0,89	1,75	0,87	1,69	0,87	1,65	0,87	1,62
0,175	0,89	1,81	0,88	1,76	0,87	1,69	0,86	1,64	0,85	1,60
0,20	0,88	1,96	0,86	1,79	0,85	1,70	0,84	1,63	0,83	1,58
0,25	0,87	2,00	0,82	1,86	0,81	1,72	0,80	1,63	0,79	1,54
0,30	0,80	2,18	0,78	1,97	0,77	1,76	0,75	1,63	0,74	1,51
0,35	0,77	2,41	0,75	2,09	0,72	1,81	0,69	1,63	0,68	1,47
0,40	0,72	2,67	0,71	2,25	0,68	1,89	0,64	1,63	0,63	1,44

Figura 18 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, cheio ou vazado com furo cilíndrico transversal, sujeito à torção.

### MÓDULO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

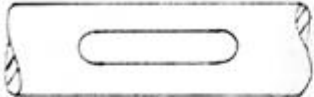
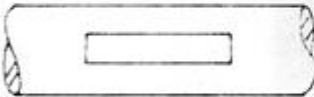

$$Z_{NET} = \frac{\pi A}{32D} (D^4 - d^4)$$

### MOMENTO POLAR DE ÁREA

$$J_{NET} = \frac{\pi A}{32} (D^4 - d^4)$$

# Coeficiente de entalhe para solicitações dinâmicas para rasgos de chaveta:

1) Solicitação de flexão alternada simétrica

A) RASGOS COM FRESA DE TOPO	Fator de concentração de tensão	
	EIXO AÇO CARBONO	EIXO AÇO CARBONO TRATADO OU AÇO-LIGA
	1,6	2,0
B) RASGOS COM FRESA WOODROFF (DE DISCO)		
	1,3	1,6
C) RASGOS CHAVETA AMERICANA (MEIA LUA)		
	2,0	3,0

2) Solicitação de torção alternada simétrica

A)	Fator de concentração de tensão	
	EIXO AÇO CARBONO	EIXO AÇO CARBONO TRATADO OU AÇO-LIGA
QUALQUER TIPO DE RASGO EXCETO AMERICANA	1,3	1,6
B) RASGO AMERICANA	1,6	2,0

**Tabela A-18**

Resistências determinísticas da ASTM mínimas de tração e de escoamento para aços laminados a quente (HR) e estirados a frio (CD). [As resistências listadas são valores mínimos estimados da ASTM no intervalo de medida de 18 a 32 mm ( $\frac{3}{4}$  a  $1\frac{1}{2}$  in). Estas resistências são apropriadas para uso com o fator de projeto (ou desenho) definido na Seção 1-10, provido que os materiais conformem aos requisitos da ASTM A6 ou A568 ou são requeridos em especificações de compra. Lembre que um sistema de numeração não é uma especificação.] Fonte: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS n°	N° SAE e/ou AISI	Processamento	Resistência à tração MPa (Kpsi)	Resistência ao escoamento MPa (Kpsi)	Alongamento em 2 in, %	Redução em área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27,5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37,5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39,5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49,5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61,5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

**Tabela A-22**

Propriedades mecânicas de três metais diferentes do aço.

(a) Propriedades típicas do ferro fundido cinza.

(O sistema de numeração da American Society for Testing and Materials (ASTM) para ferro fundido cinza é tal que os números correspondem à resistência mínima à tração em kpsi. Assim um ferro fundido ASTM nº 20 tem uma resistência mínima à tração de 20 kpsi. Note particularmente que as classificações são típicas de vários aquecimentos.)

Número da ASTM	Resistência de tração $S_{UT}$ , MPa	Resistência de compressão $S_{UC}$ , MPa	Módulo de cisalhamento de ruptura $S_{U\tau}$ , MPa	Módulo de elasticidade, GPa		Limite de endurance* $S_e$ , MPa	Dureza Brinell $H_B$	Fator de concentração de tensão de fadiga $K_f$
				Tração <sup>†</sup>	Torção			
20	152	572	179	9,6-14	3,9-5,6	69	156	1,00
25	179	669	220	11,5-14,8	4,6-6,0	79	174	1,05
30	214	752	276	13-16,4	5,2-6,6	97	201	1,10
35	252	855	334	14,5-17,2	5,8-6,9	110	212	1,15
40	293	970	393	16-20	6,4-7,8	128	235	1,25
50	362	1130	503	18,8-22,8	7,2-8,0	148	262	1,35
60	431	1293	610	20,4-23,5	7,8-8,5	169	302	1,50

\* Espécimes polidos ou usinados.

<sup>†</sup> O módulo de elasticidade de ferro fundido em compressão corresponde aproximadamente ao valor superior no intervalo dado para tração e é mais invariante que aquele para tração.



**Tabela A-22**

Continuação.

(b) Propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio.

(Estas são propriedades típicas para tamanhos de cerca de  $\frac{1}{2}$  in; propriedades similares podem ser obtidas usando-se especificações de compra apropriadas. Os valores dados para resistência à fadiga correspondem a  $50(10^7)$  ciclos de tensão completamente reversa. Ligas de alumínio não tem um limite de endurance. As resistências de escoamento foram obtidas pelo método de 0,2% de desvio de deformação.)

Número da associação do alumínio	Revenido	Escoamento, $S_y$ , MPa (kpsi)	Revenido		Alongamento em 2 in, %	Dureza Brinell $H_B$
			Tração, $S_{ut}$ , MPa (kpsi)	Fadiga, $S_f$ , MPa (kpsi)		
forjado:						
2017	O	70 (10)	179 (26)	90 (13)	22	45
2024	O	76 (11)	186 (27)	90 (13)	22	47
	T3	345 (50)	482 (70)	138 (20)	16	120
3003	H12	117 (17)	131 (19)	55 (8)	20	35
	H16	165 (24)	179 (26)	65 (9,5)	14	47
3004	H34	186 (27)	234 (34)	103 (15)	12	63
	H38	234 (34)	276 (40)	110 (16)	6	77
5052	H32	186 (27)	234 (34)	117 (17)	18	62
	H36	234 (34)	269 (39)	124 (18)	10	74
Fundido:						
319,0*	T6	165 (24)	248 (36)	69 (10)	2,0	80
333,0†	T5	172 (25)	234 (34)	83 (12)	1,0	100
	T6	207 (30)	289 (42)	103 (15)	1,5	105
335,0*	T6	172 (25)	241 (35)	62 (9)	3,0	80
	T7	248 (36)	262 (38)	62 (9)	0,5	85

\* Fundição em areia.

† Fundição de molde permanente.

**Valores dos Limites de escoamento  
para aço carbono estrutural**

Denominação ASTM	Limite mínimo de Escoamento (MPa)
A 36	220-250 (M)
A 131	220
A 283 (graus C,D)	165 - 230 (M)
A 284	205-230 (M)
A 529	290
A 573	220 - 290 (M)
A 678	345 - 450 (M)
A 709	250

(M) Valores dependem da espessura  
e largura da parte

# 6. Resistência à fadiga torcional sob tensões flutuantes

$$S_{su} = 0,67S_{ut} \quad (\text{Resultados experimentais})$$

$$S_{sy} = 0,577S_{yt} \quad (\text{Teoria da Energia de Distorção})$$

# 7. Combinação de modos de carregamento

$$\sigma'_a = \left\{ \left[ K_f \text{ flexão} \sigma_a \text{ flexão} + K_f \text{ axial} \frac{\sigma_a \text{ axial}}{0,85} \right]^2 + 3 \left[ K_f \text{ torção} \tau_a \text{ torção} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$$\sigma'_m = \left\{ \left[ K_f \text{ flexão} \sigma_m \text{ flexão} + K_f \text{ axial} \sigma_m \text{ axial} \right]^2 + 3 \left[ K_f \text{ torção} \tau_m \text{ torção} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

**ATENÇÃO:**  $k_b$  = fator de modificação de tamanho para flexão e torção  
 $k_c = 1$  (para flexão)

# 8. Fadiga de parafusos sob carga de tração variável

## 8.1 FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO PARA ELEMENTOS ROSCADOS ( $K_f$ )

<b>Grau SAE</b>	<b>Grau métrico</b>	<b>Roscas laminadas</b>	<b>Roscas usinadas</b>	<b>Filete</b>
0 a 2	3,6 a 5,8	2,2	2,8	2,1
4 a 8	6,6 a 10,9	3,0	3,8	2,3

Tabela 8-16 – (Shigley) de W.D. Pilkey, 1997

Obs.: Fatores de concentração de tensão já corrigidos quanto à sensibilidade ao entalhe e acabamento superficial



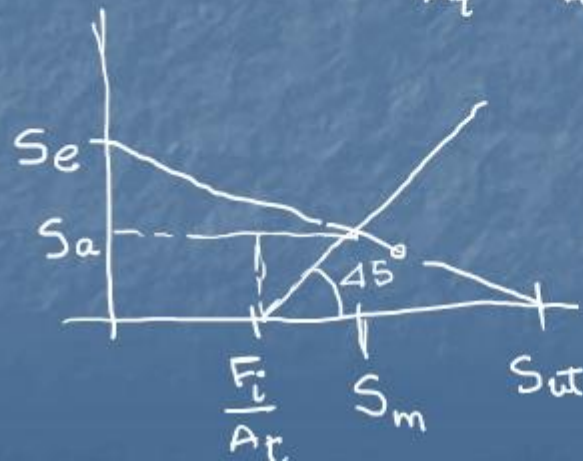


$$\sigma_{\max} = \frac{CP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{F_i}{A_t}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \left( \frac{CP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} \right) / 2 = \frac{CP}{2A_t} + \frac{F_i}{A_t}$$

$$\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_m = \frac{CP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} - \left( \frac{CP}{2A_t} + \frac{F_i}{A_t} \right) = \frac{CP}{2A_t}$$



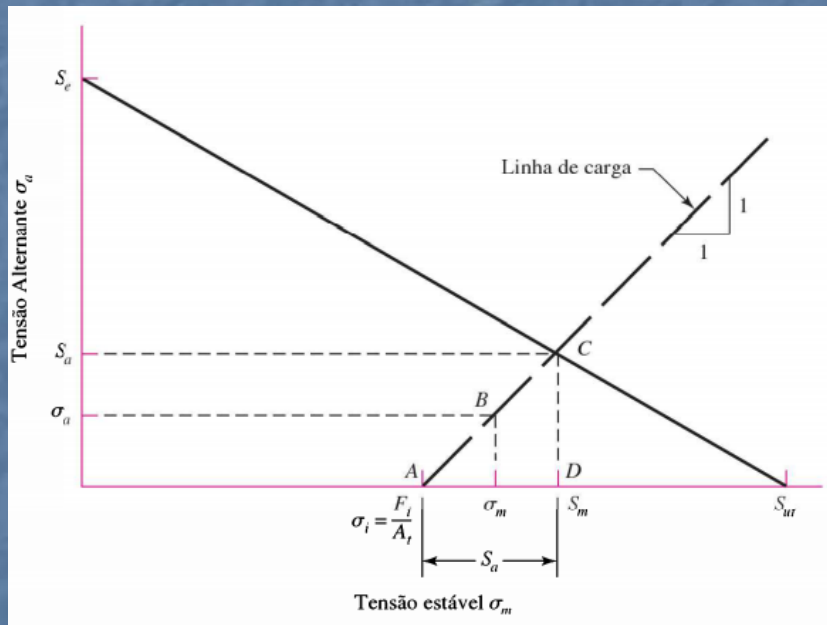
## 8.2 RESISTÊNCIA LIMITE DE FADIGA ( $S_e$ ) TOTALMENTE CORRIGIDA PARA PARAFUSOS LAMINADOS

Grau ou classe	Intervalo de tamanho	Resistência de fadiga
SAE 5	$\frac{1}{4}$ -1 in	18,6 kpsi
	$1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$ in	16,3 kpsi
SAE 7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$ in	20,6 kpsi
SAE 8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$ in	23,2 kpsi
ISO 8,8	M16-M36	129 MPa
ISO 9,8	M1,6-M16	140 MPa
ISO 10,9	M5-M36	162 MPa
ISO 12,9	M1,6-M36	190 MPa

\*Carga aplicada repetidamente, carregamento axial, correção integral.

Tabela 8-17 – (Shigley)

## 8.3 FATOR DE SEGURANÇA CONTRA A FADIGA ( $n_f$ ) USANDO O CRITÉRIO DE GOODMAN



$$n_f = \frac{2S_e(S_{ut}A_t - F_i)}{CP(S_{ut} + S_e)}$$

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

$$\left. \begin{aligned} S_a &= n_f \sigma_a \\ S_m &= n_f \sigma_m \end{aligned} \right\}$$

se não houver pré-carga

$$C = 1 \text{ e } F_i = 0$$

$$\eta_{f_0} = \frac{2 S_e S_{ut} A_t}{P (S_{ut} + S_e)}$$

se  $\left\{ \begin{array}{l} \eta_f > \eta_{f_0} \Rightarrow \text{condição que } F_i \text{ é} \\ \text{ainda benéfica} \\ \eta_f < \eta_{f_0} \rightarrow F_i \text{ passa a ser inútil} \\ \text{(a mais)} \end{array} \right.$

$$\frac{\eta_f}{\eta_{f_0}} = \frac{S_{ut} A_t - F_i}{C S_{ut} A_t} \Rightarrow \boxed{F_i = (1 - C) S_{ut} A_t}$$



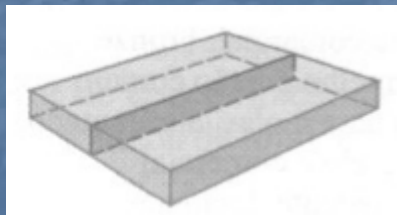
# 9. Fadiga de junções soldadas

Localização	$K_f$
ZAC <sup>1</sup> do reforço da junta de topo (mesmo se rebaixado por esmeril) (a)	1,2
Margem do filete de solda transverso (b)	1,5
Final de filete de solda paralelo (c)	2,7
Margem da junta em ângulo (T) (d)	2,0

<sup>1</sup>Zona afetada pelo calor.

Tabela 9-5 adaptada do Shigley

Obs.: Usar fator de acabamento superficial como forjado



(a)



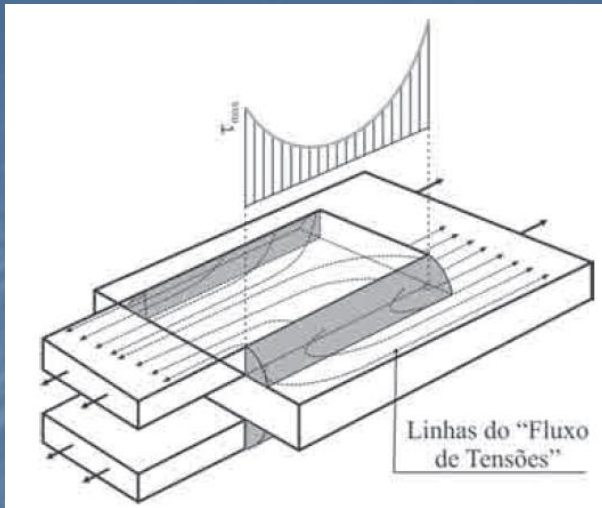
(b)



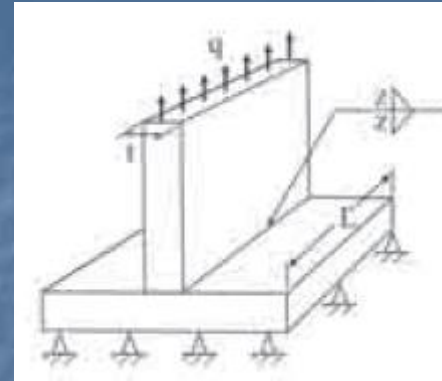
(c)



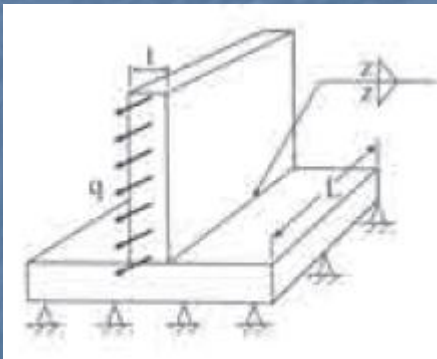
(d)



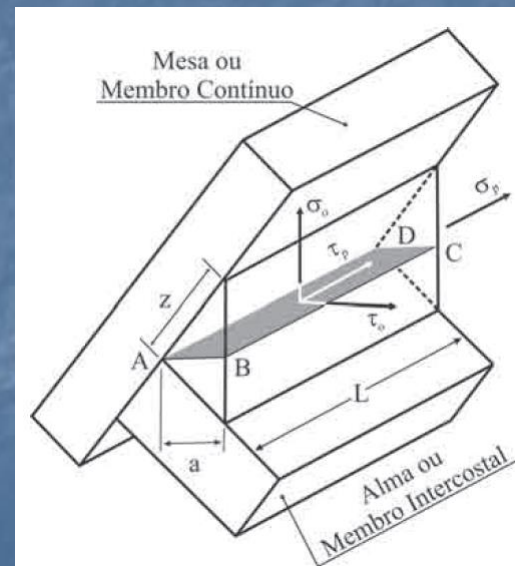
Concentração de tensão nas extremidades da junta longitudinal (filete paralelo, c)



Junta soldada de filete do tipo transversal em T (d)



Junta soldada de filete do tipo longitudinal em T (b)



Junta soldada de filete – ilustração da garganta

## Para solda

Mann:  $k_a \rightarrow$  acabamento  $\rightarrow$  forjado

$$S_e \leftrightarrow S'_e$$



$$S'_e = 0,5 S_{ut} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{o material mais} \\ \text{fraco entre o} \\ \text{mat. de base e o} \\ \text{mat. de adiao} \end{array} \right.$$

$k_b = 1 \rightarrow$  porque o cisalhamento   uniforme

eg. Goodman, no lugar de  $S_{ut} \rightarrow$   $S_{us} = 0,67 S_{ut}$   
Gerber

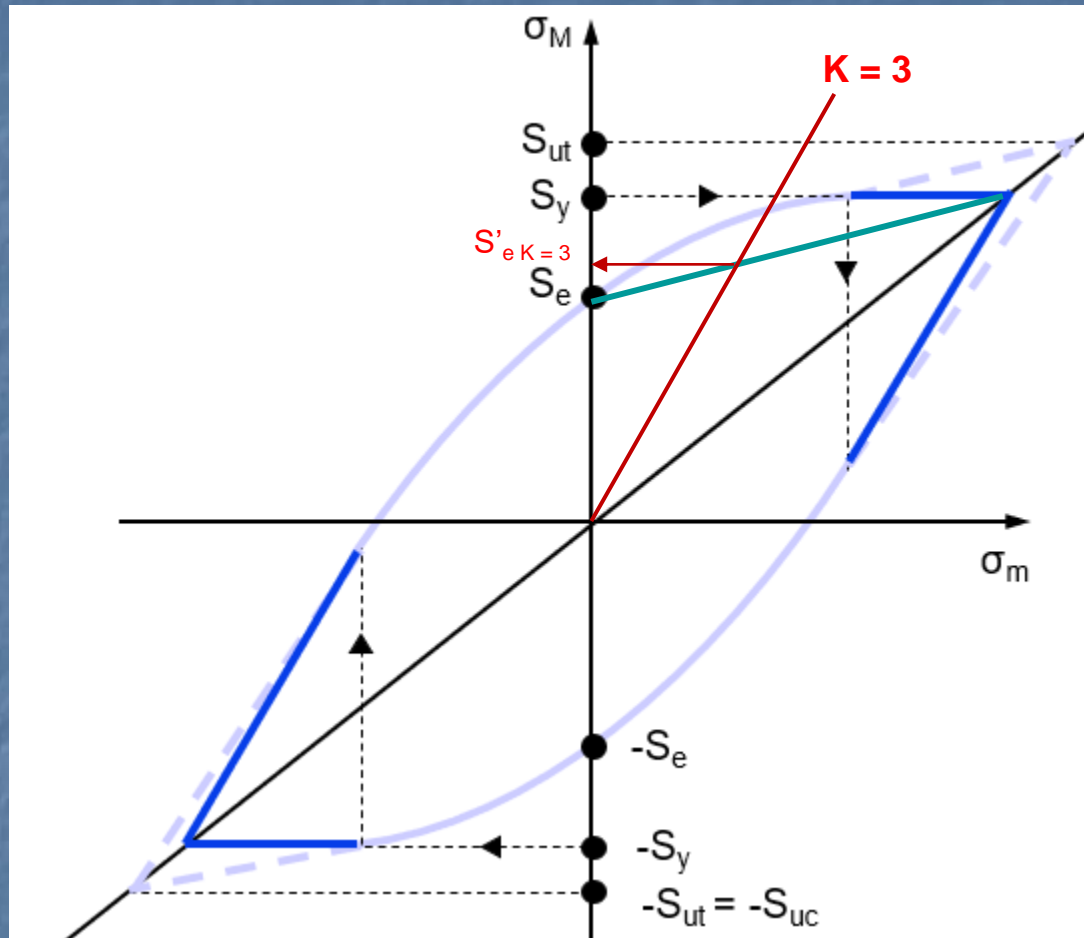
## Exercício

Para um determinado material dúctil são conhecidos os valores de  $S_{ut}$  e de  $S_e$  ( $S_e = 0,4 S_{ut}$ ) para carregamentos cíclicos à flexão. Um corpo de prova deste material é submetido a uma flexão variável com  $\sigma_{max} = 0,6 S_{ut}$  e  $\sigma_{min} = -0,2 S_{ut}$  (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  $\sigma_{max}$  e  $\sigma_{min}$  para que se trabalhe no limite de resistência à fadiga.
- Refazer o cálculo anterior analiticamente.



# Diagrama de Smith



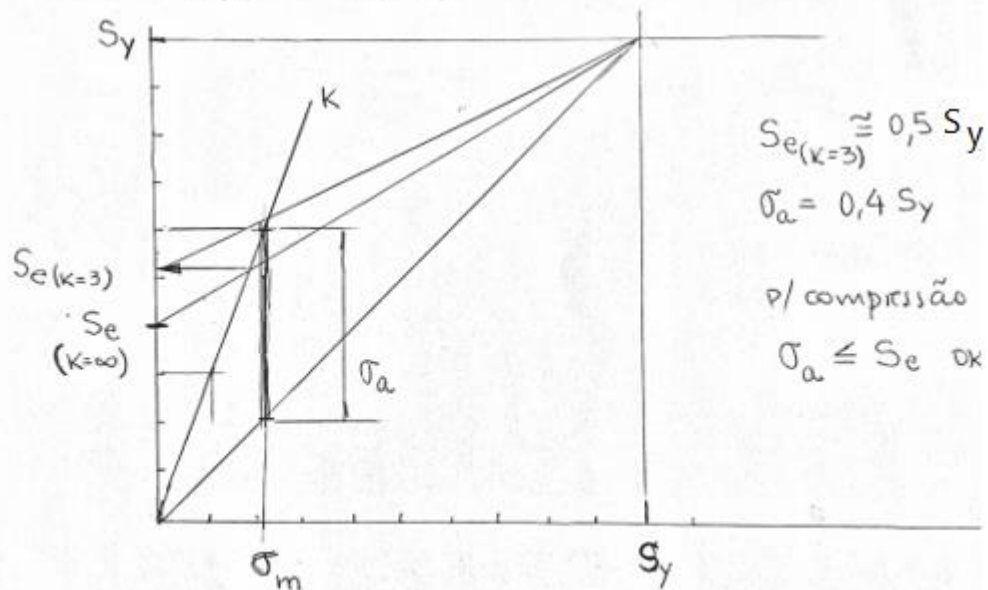
### EXERCÍCIO

$$\sigma_M = \sigma_{\max} = 0,6 S_y$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,6 S_y + (-0,2 S_y)}{2} = 0,2 S_y$$

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m} = \frac{0,6 S_y}{0,2 S_y} = 3$$

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



a) e b)

c)

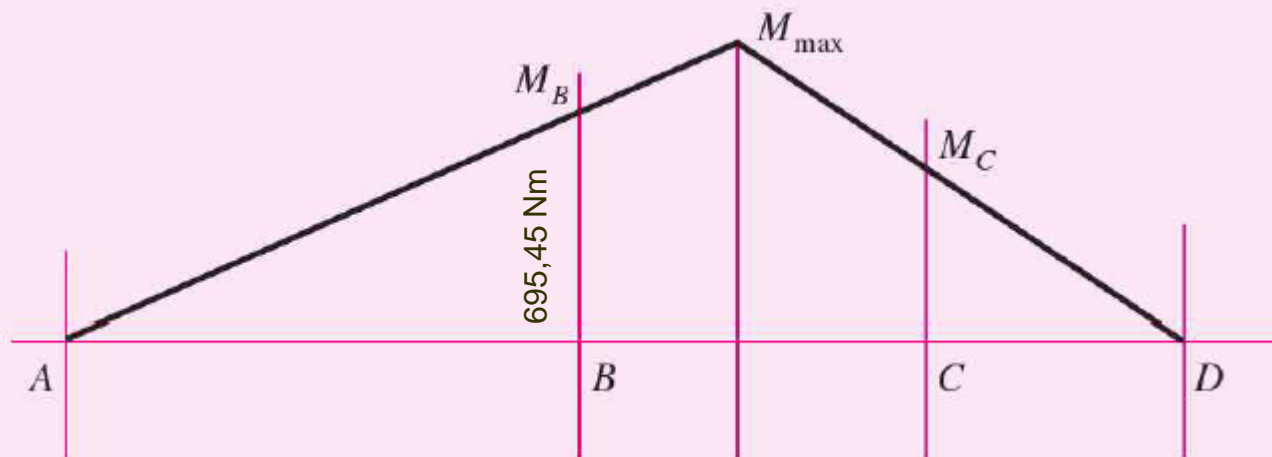
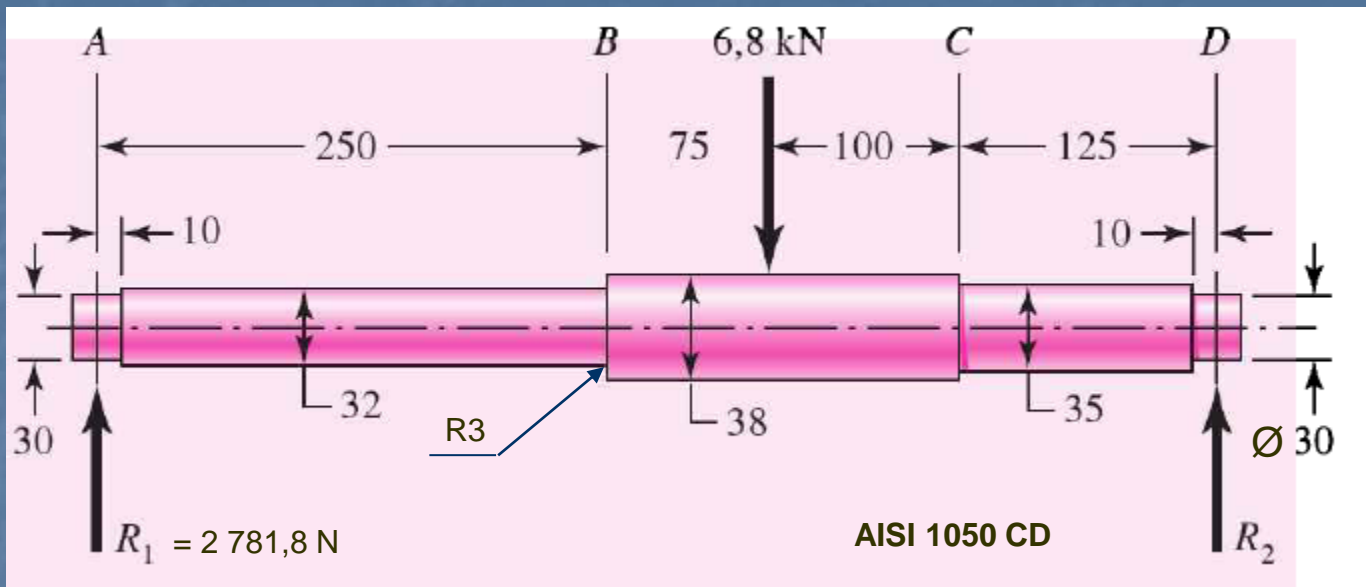
$$y = S'_{e_{k=3}} = \frac{S'_e}{1 - \frac{1}{k} \left(1 - \frac{S'_e}{S_y}\right)}$$

$$y = S'_{e_{k=3}} = \frac{0,4 S_y}{1 - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{0,4 S_y}{S_y}\right)}$$

$$S'_{e_{k=3}} = \frac{0,4 S_y}{1 - \frac{1}{3} (0,6)} = \frac{0,4 S_y}{1 - 0,2} = \frac{0,4 S_y}{0,8}$$

$$S'_{e_{k=3}} = 0,5 S_y$$

# EXEMPLO 6-9





## EXEMPLO 6-14

Qual o coeficiente de segurança para fadiga de vida infinita usando Goodman.

$T = 120 \text{ N m}$  (totalmente reverso)

$M = 150 \text{ N m}$  (totalmente reverso)

AISI 1018 CD

