

5- Tensão Admissível à Fadiga

Peça terá vida infinita (isto é $N > N_{crit}$) se :

$$S_{max} \leq S_{Fadm}$$

Modelo 1 :

$$S_{Fadm} = S_F \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot b_3}{\beta_k \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5}$$

corpo de prova

Modelo 2 :

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

corpo de prova

Adotado por : Shigley, J. E. et al. *Mechanical Engineering Design*.
Norton R. L. *Projeto de máquinas*

5- Tensão Admissível à Fadiga

Peça terá vida infinita (isto é $N > N_{crit}$) se :

$$S_{max} \leq S_{Fadm}$$

$$S_{Fadm} = S_F \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot b_3}{\beta_k \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5}$$

S_{Fadm} = tensão de fadiga admissível

S_F - limite de resistência à fadiga para o **corpo de prova** e sob mesma solitação k da peça

$b_1, b_2, b_3 \rightarrow$ fatores de influência

η_i = coeficientes de segurança

β_k = coeficiente de entalhe

* Se $k = \infty$ usar Fig.1 da apostila de ábacos de fadiga (caso de flexão) ou Fig.2 (caso de tensão uniaxial: tração/compressão) ou Fig.3 (torção) para obter :

$$S_F = S_{Fa}$$

* Se $k \neq \infty$, com S_{Fa} obtido acima e mais S_e e montar Goodman simplificado e obter

$$S_F = f(S_{Fa}, k, b_1, b_2, \beta_k)$$

* Hänchen R., *Resistencia a la fatiga*, Reverte, 201p. 1960

S_{Fa} (Kgf/mm²)

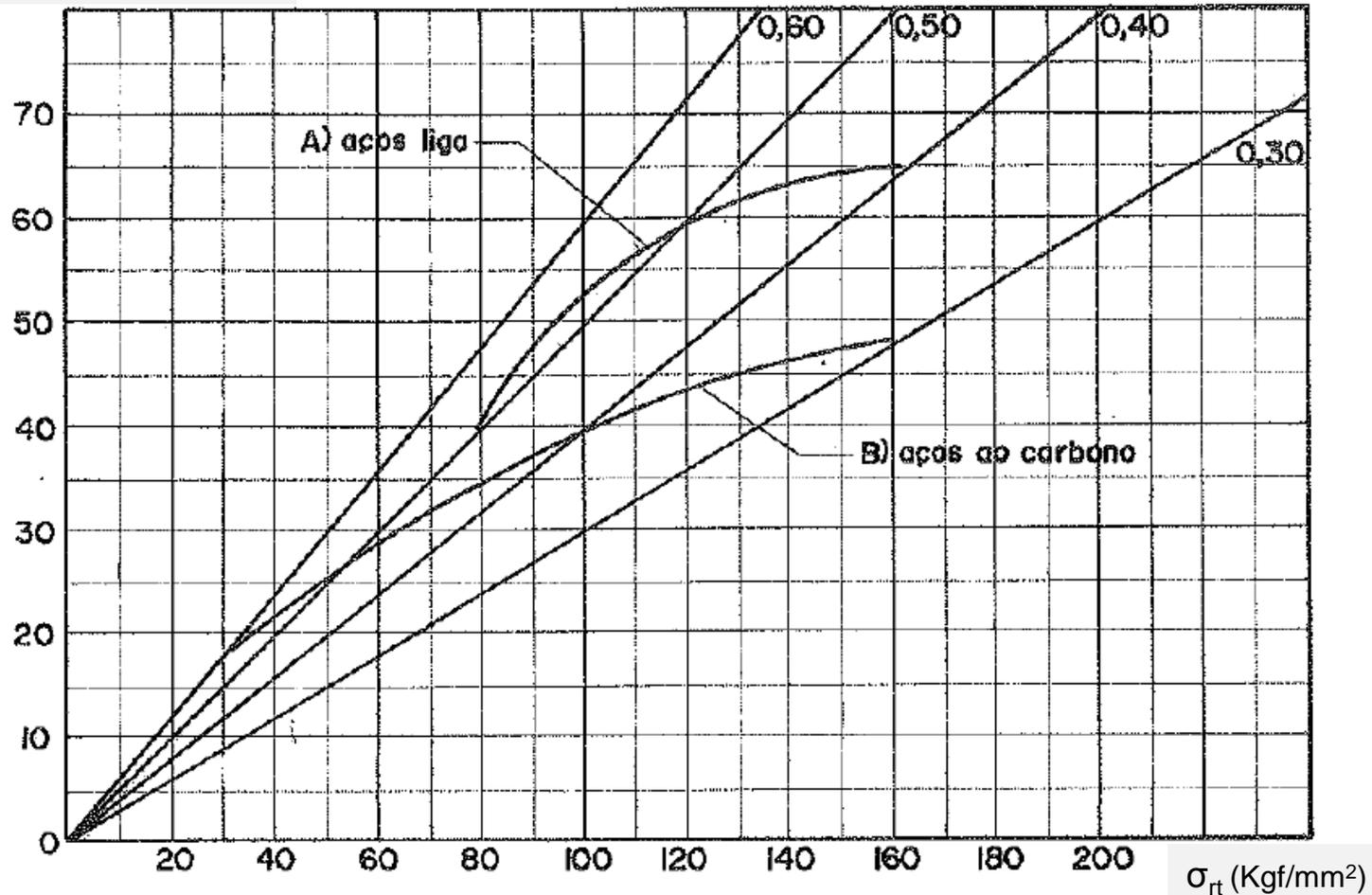


Figura 1 - Curvas do limite de resistência à fadiga alternada simétrica de **FLEXÃO (Pura e mista)** para aços em função da tensão de ruptura a Tração.

S_{Fa} (Kgf/mm²)

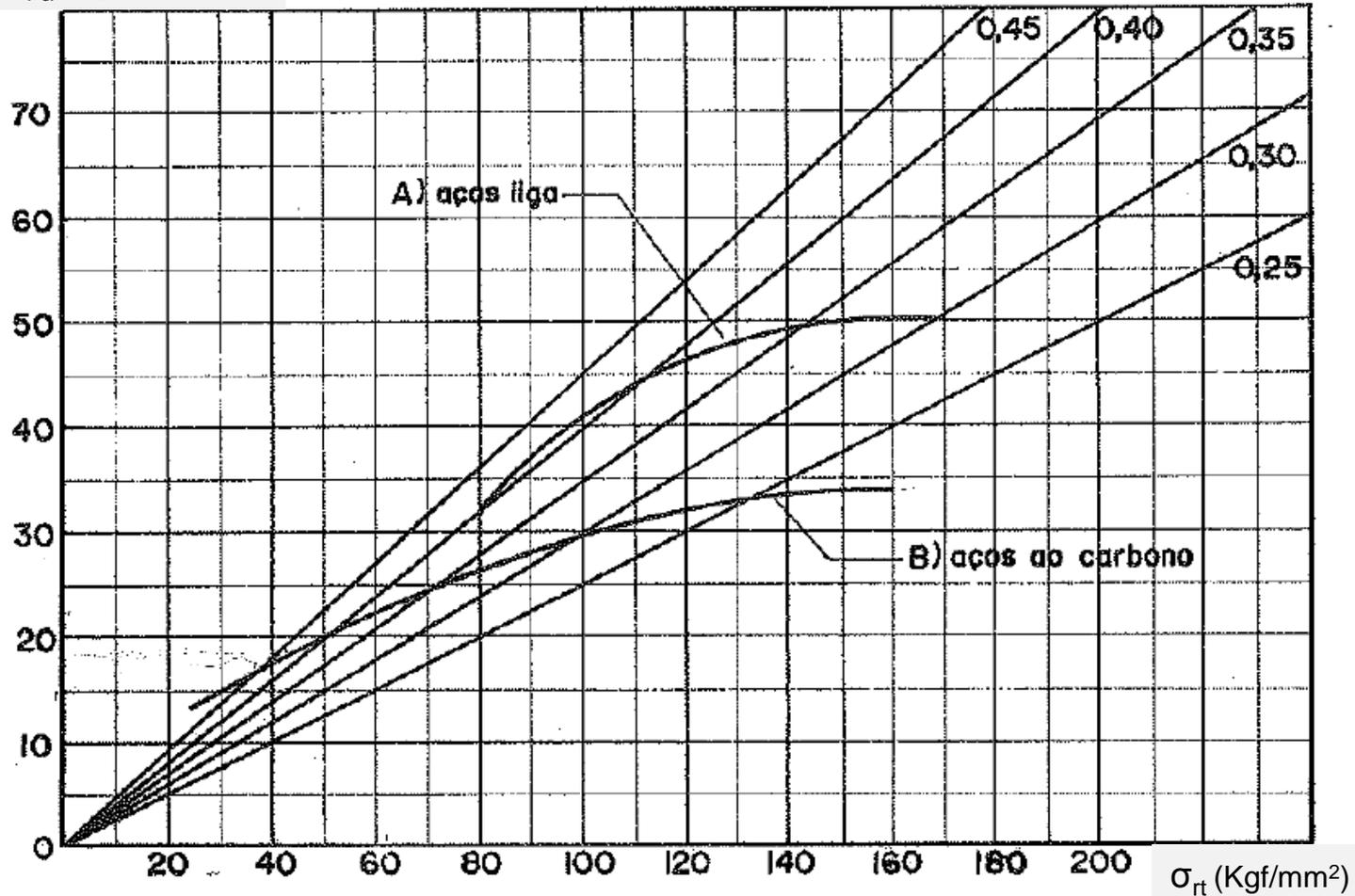


Figura 2 - Curvas do limite de resistência à fadiga alternada simétrica **AXIAL** para aços em função da **tensão de ruptura a Tração. (Axial pura)**

S_{Fa} (Kgf/mm²)

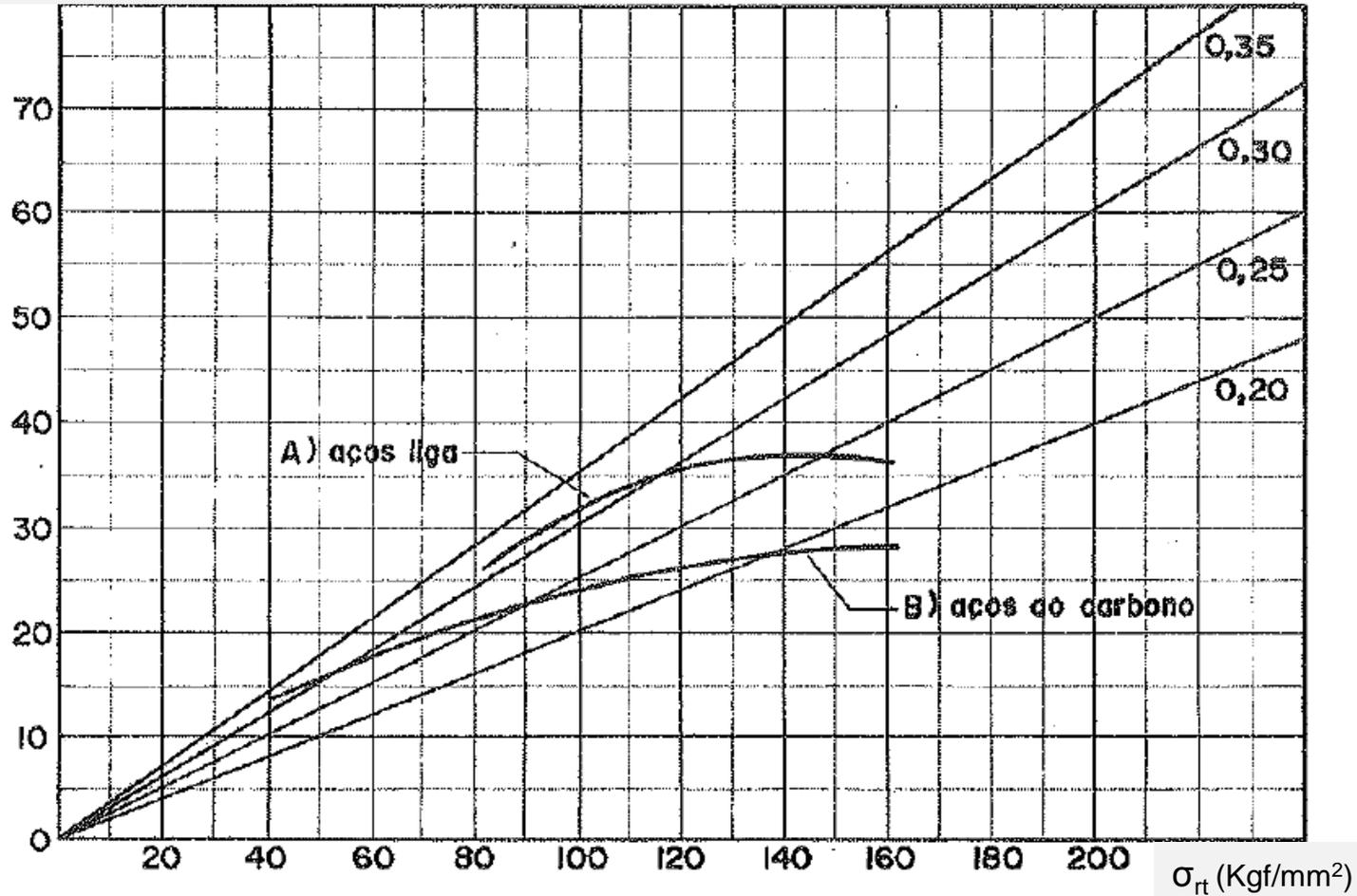


Figura 3 - Curvas do limite de resistência à fadiga alternada simétrica de **TORÇÃO** para aços em função da tensão de ruptura a Tração. (Torção pura)

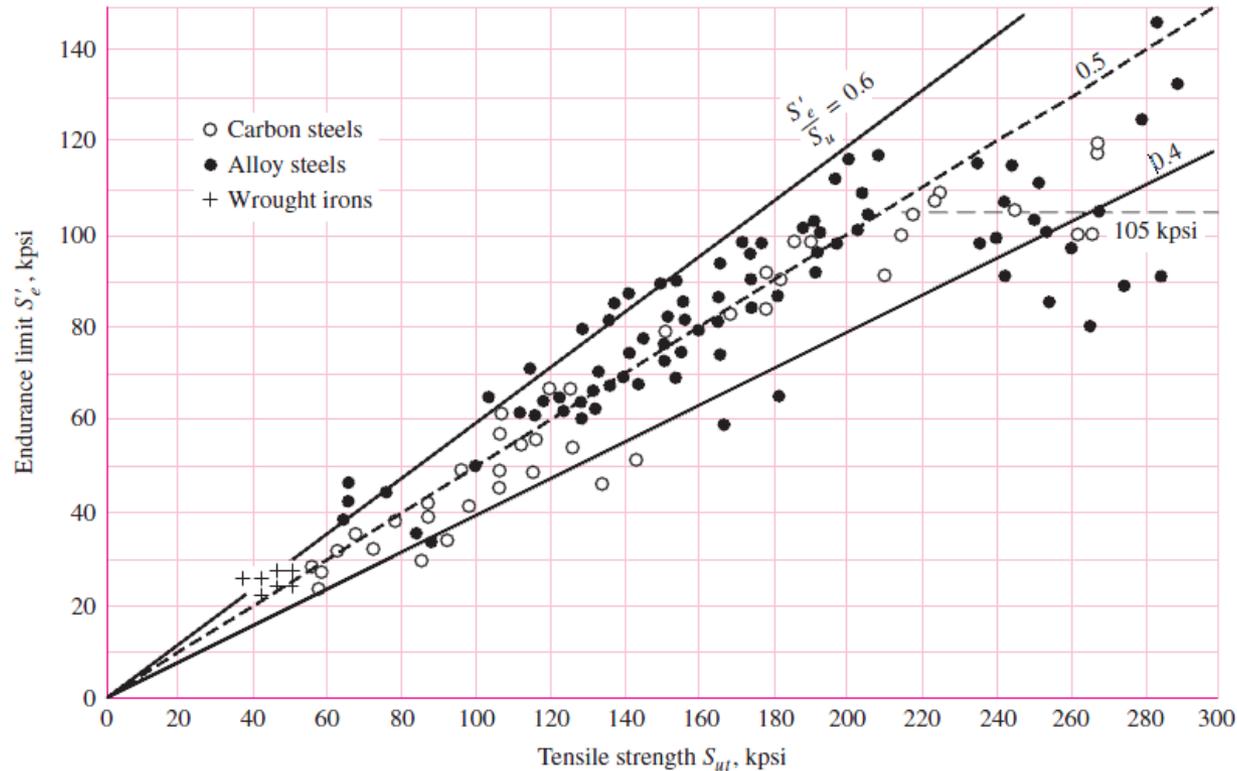


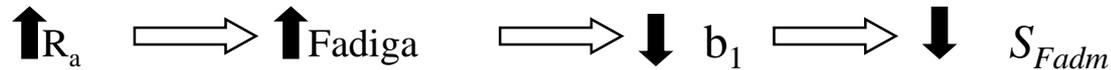
Figure 6–17 - Graph of endurance limits versus tensile strengths from actual test results for a large number of wrought irons and steels. Ratios of S_e/S_{ut} of 0.60, 0.50, and 0.40 are shown by the solid and dashed lines. Note also the horizontal dashed line for $S_e = 105$ kpsi. Points shown having a tensile strength greater than 210 kpsi have a mean endurance limit of $S_e = 105$ kpsi and a standard deviation of 13.5 kpsi. (Collated from data compiled by H. J. Grover, S. A. Gordon, and L. R. Jackson in *Fatigue of Metals and Structures, Bureau of Naval Weapons Document NAVWEPS 00-25-534, 1960*; and from *Fatigue Design Handbook, SAE, 1968, p. 42.*)

b_1, b_2 e b_3 - Fatores de influência

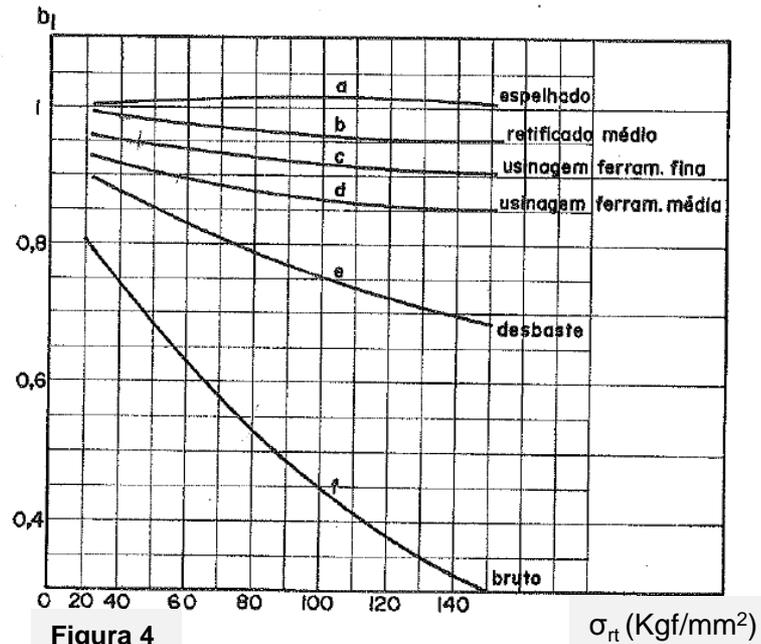
• b_1 \implies Coeficiente de acabamento superficial

- Fadiga depende do acabamento
 - R_a do corpo de prova \neq do R_a da peça
- } $\implies b_1$

$$b_1 = f(\sigma_{rt})$$

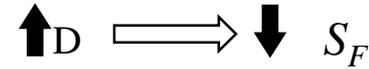


- A operação de **shot peening** (bombardeamento com granalha de aço) é usada para aliviar tensões superficiais e melhorar o comportamento à fadiga.



• b_2 \longrightarrow Coeficiente dimensional

Fadiga depende da dimensão da peça.



- Kugel : Diâmetro maior (maior volume de material) implica em 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.

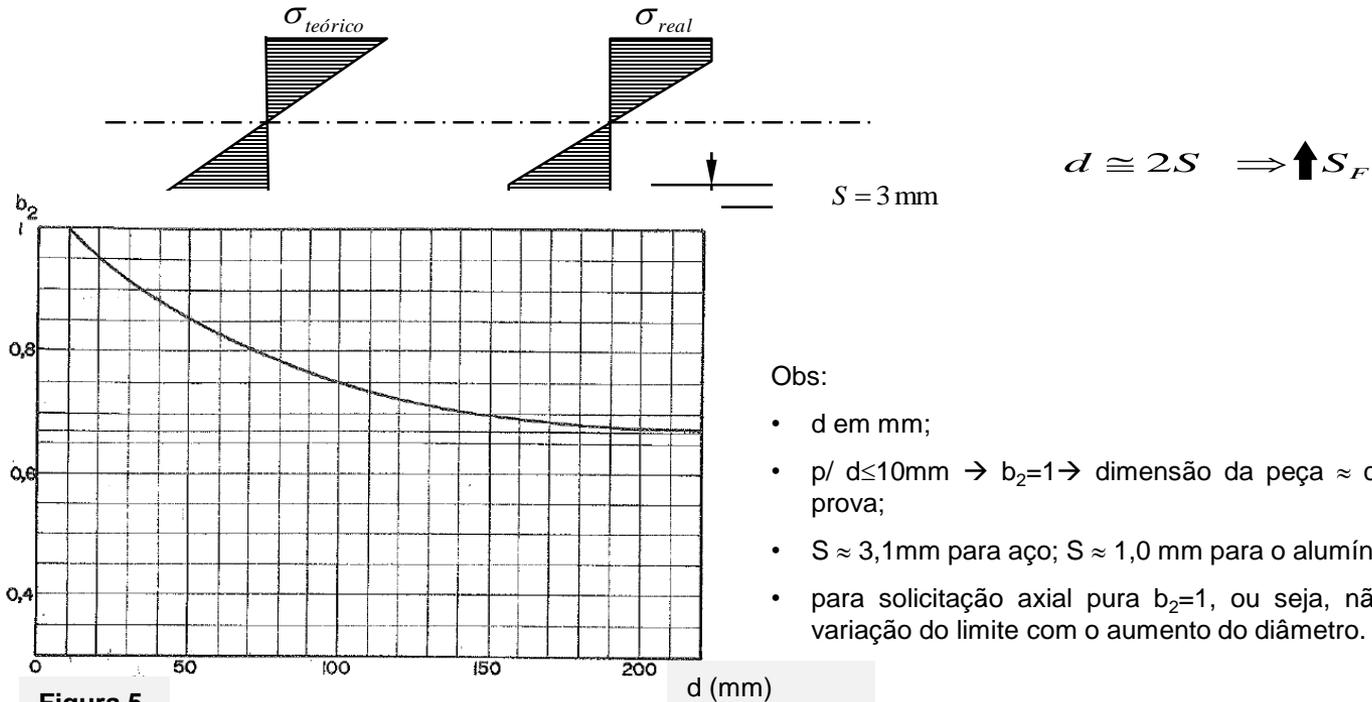


Figura 5

Obs:

- d em mm;
- $p/ d \leq 10\text{mm} \rightarrow b_2=1 \rightarrow$ dimensão da peça \approx corpo de prova;
- $S \approx 3,1\text{mm}$ para aço; $S \approx 1,0\text{ mm}$ para o alumínio;
- para solicitação axial pura $b_2=1$, ou seja, não existe variação do limite com o aumento do diâmetro.

Um equacionamento para calcular b_2 é proposto por Shigley e Mitchel*

para $d \leq 8 \text{ mm}$:

$$b_2 = 1$$

para $8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm}$:

$$b_2 = 1,189.d^{-0,097}$$

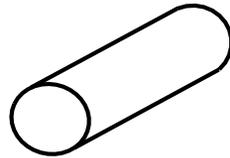
para $d \geq 250$:

$$b_2 = 0,6$$

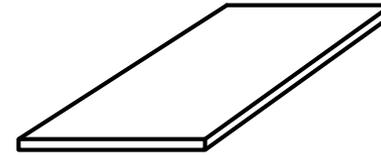
*Shigley, J.E.; Mitchell, L.D. Mechanical Engineering Design, 4th ed., Mc-Graw-Hill: New York, p.293,1983.

- b_3 \longrightarrow Coeficiente de forma da secção

$$k = 2$$



$$S_F = 100\%$$



$$S_F = 63\%$$

Assume-se $b_3 = 1$ para secção circular.

A distribuição de tensão depende da forma da secção (há formas de secção mais críticas que outras)

$$S_{F_{\text{forma geométrica}}} = S_{F_{\text{círculo}}} \cdot b_3$$

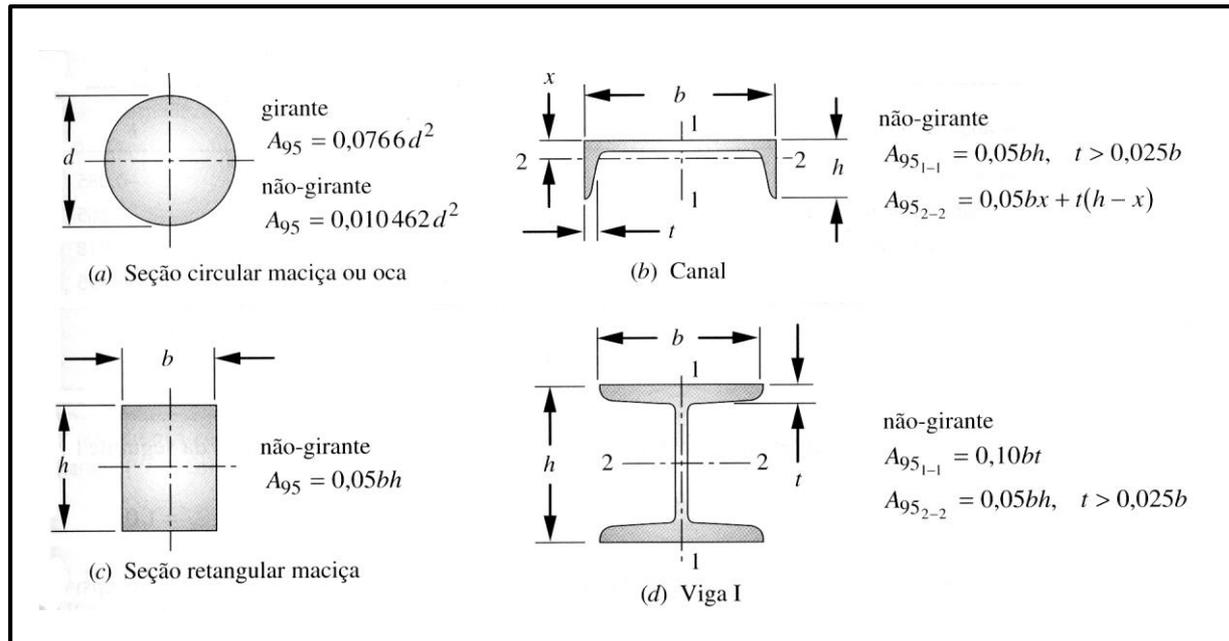
Se necessário ensaia-se a peça de forma genérica \Rightarrow Wohler \Rightarrow Goodman

Obtém-se $S_{F_{\text{forma geométrica}}}$ e faz-se

$$S'_F = S_{F_{\text{forma geométrica}}} \cdot b_3 \quad (b_3 = 1)$$

- b_2 e b_3 combinados pela área $A_{0,95\sigma}$ de formatos comuns

O equacionamento para calcular b_2 proposto por Shigley e Mitchel é válido para seção transversal circular. Para peças com outros formatos Kuguel sugeriu equivalência da área da seção transversal com a área de um corpo de prova circular submetido à flexão rotativa. Um diâmetro equivalente é obtido quando a área da seção transversal da peça que estiver sujeita a uma tensão superior a 95% da tensão máxima da seção for igual a área correspondente de uma peça de seção circular.



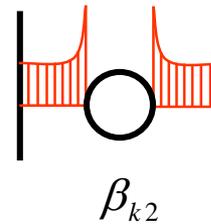
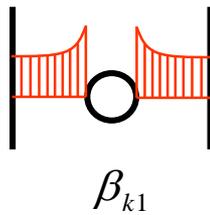
$$d_{equiv} = \sqrt{\frac{A_{95}}{0,0766}}$$

Norton R. L. *Projeto de máquinas*. Ed. Bookman, 2004

• β_k \longrightarrow Coeficiente de entalhe para solitação dinâmica

β_k depende de :

- Material : $\uparrow \sigma_{rt}$, \downarrow ductilidade, $\uparrow \beta_k$ (e portanto $\downarrow S_{Fadm}$)
- Tipo de entalhe: \uparrow concentração de tensão, $\uparrow \beta_k$
- Dimensão relativa entalhe/peça : \uparrow região de concentração de tensões , $\uparrow \beta_k$

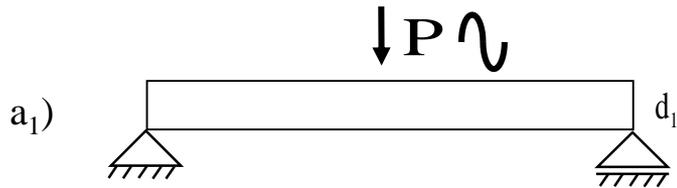


$$\beta_{k1} < \beta_{k2}$$

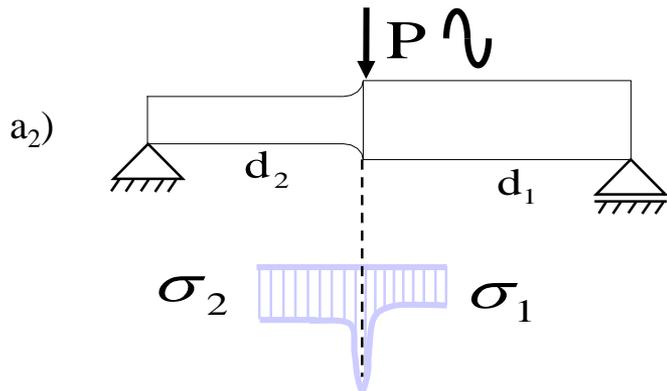
- Tipo de solitação (flexão, torção, ...)
- Variação da solitação : $\uparrow k$, $\uparrow \beta_k$

Como obter β_k

a) obter β_k por ensaios diretos



$$S_{Fafa_1} \Rightarrow Goodman \Rightarrow S_{Fka_1}$$



$$S_{Fafa_2} \Rightarrow Goodman \Rightarrow S_{Fka_2}$$

$$\beta_k = \frac{S_{Fka_1}}{S_{Fka_2}}$$

b) obter β_k por gráficos e ábacos disponíveis

Alguns casos, obtenção direta de β_k em função de σ_{rt}

- OBS.:
- 1) Efetuar interpolações necessárias
 - 2) β_k diferentes para M_f , M_t e sollicitação uniaxial
 - 3) Efetuar correções de configuração de entalhe

$$\frac{d_2}{d_1}, \frac{r}{d}, \frac{\phi}{d} \text{ etc.}$$

- 4) β_k dos ábacos são válidos para $k = \infty$

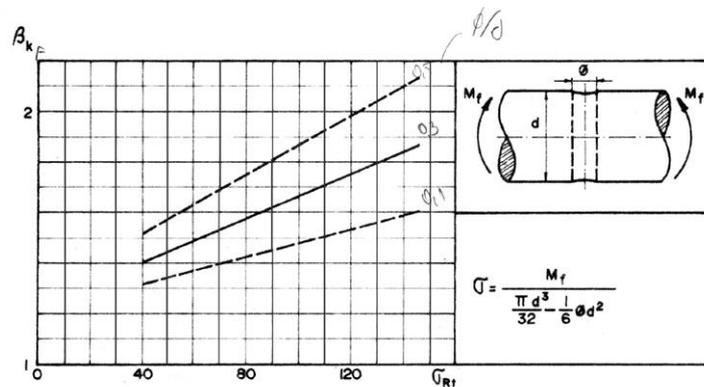


Figura 6

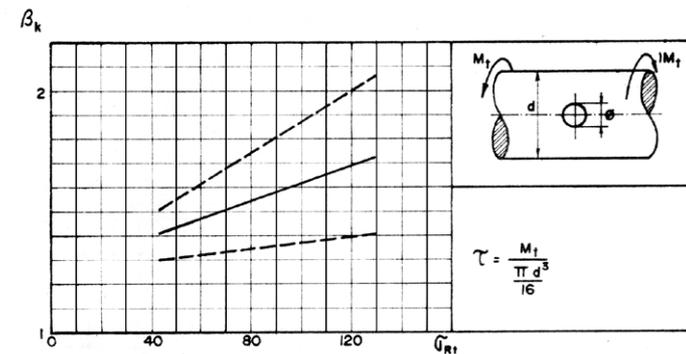


Figura 7

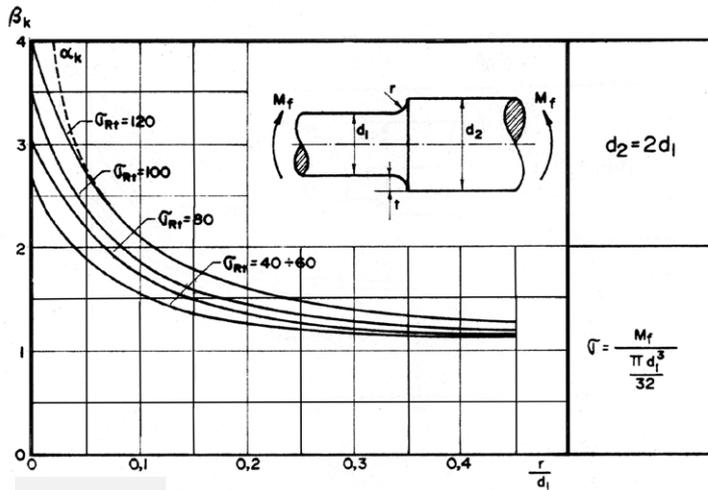


Figura 8

Para $\frac{d_2}{d_1} \neq 2 \Rightarrow \beta_k = 1 + c \left(\beta_k \frac{d_2=2}{d_1} - 1 \right)$

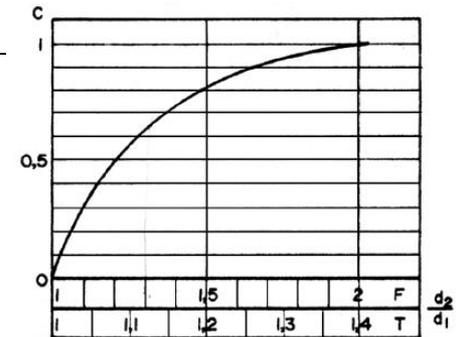


Figura 10

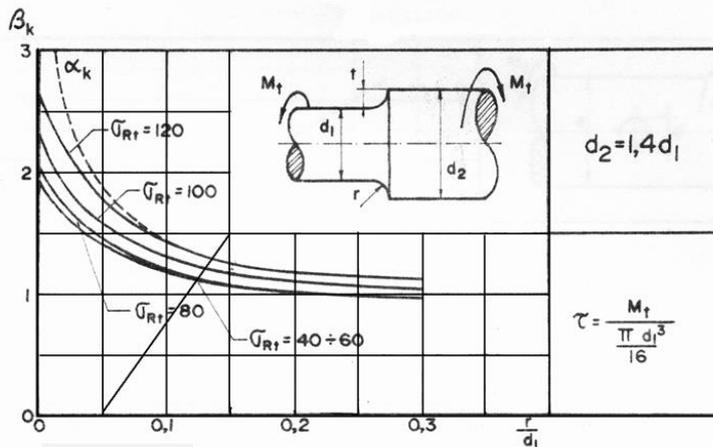
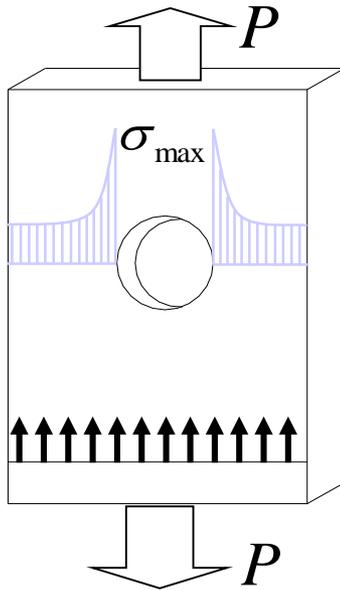


Figura 9

c) obter β_k através de α_k

α_k : Coeficiente de entalhe para solicitações estáticas.



$$\sigma_m = \frac{P}{(b-d)h}$$

$$\sigma_n = \frac{P}{b.h}$$

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m}$$

$$\alpha_k > \beta_k > 1$$

α_k : Medida da concentração de tensões

É mais fácil de ser obtido que β_k

- Gráficos e ábacos
- Casos simples : teoria da elasticidade
- Maioria dos casos :

{	Elementos finitos Fotoelasticidade Determinação experimental
---	--

Tendo-se α_k

$$\beta_k = 1 + \eta_k (\alpha_k - 1)$$

η_k : coeficiente de sensibilidade ao entalhe

Coeficiente de sensibilidade ao entalhe

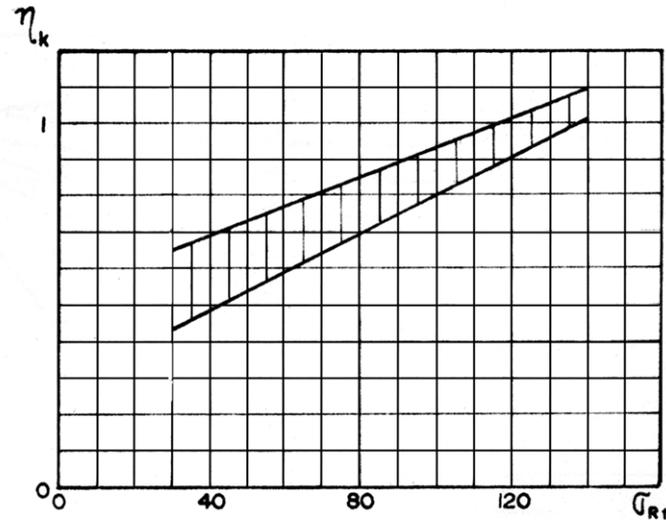


Figura 11

Para o mesmo σ_{Rt} , escolher η_k de acordo com :

- Fragilidade do aço $\uparrow \rightarrow \uparrow \eta_k$
- Tensão de ruptura $\uparrow \rightarrow \uparrow \eta_k$
- Severidade do entalhe (D/d por ex.) $\uparrow \rightarrow \uparrow \eta_k$
- Valor de $\alpha_k \uparrow \rightarrow \uparrow \eta_k$

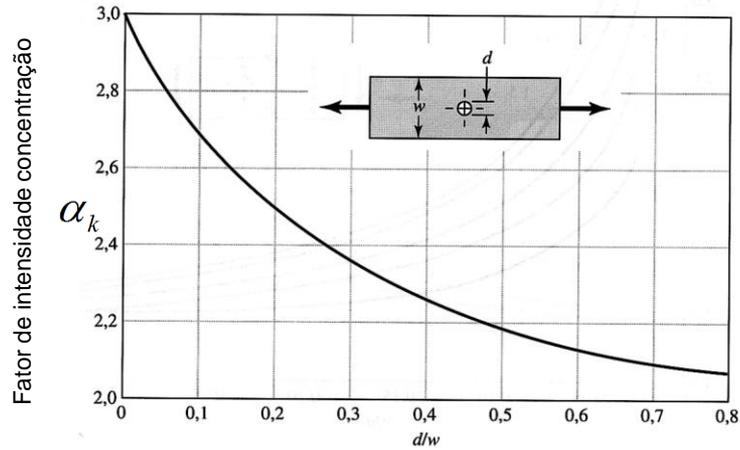


Figura 12 - Fator de concentração de tensão para uma barra retangular sujeita à tração ou compressão com um furo transversal

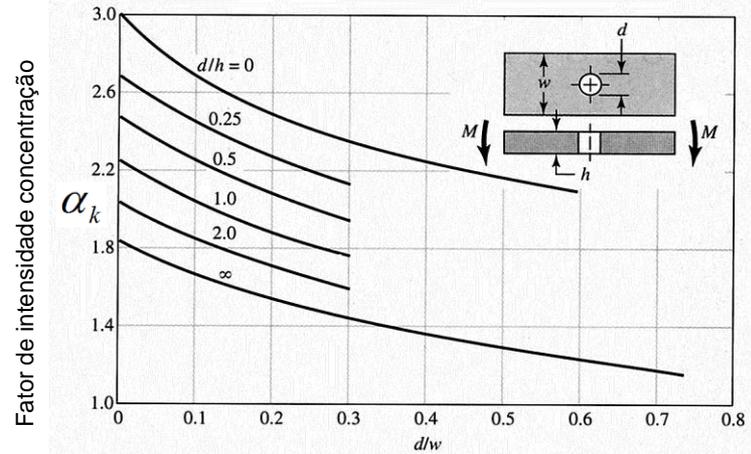


Figura 13 - Fator de concentração de tensão para uma barra retangular sujeita à flexão com um furo transversal

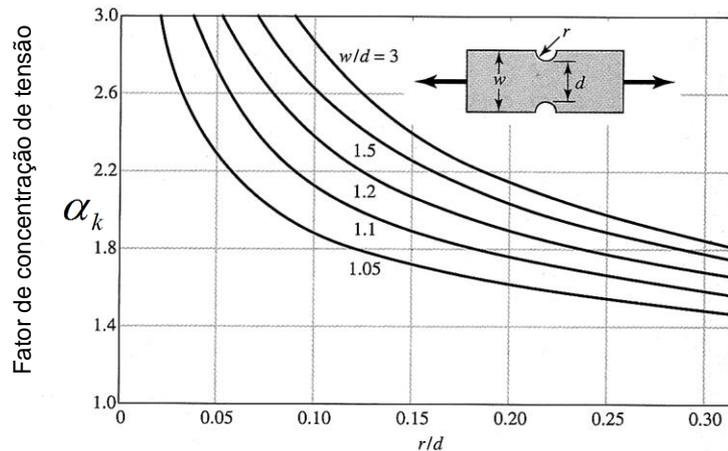


Figura 14 - Fator de concentração de tensão para uma barra com entalhes, sujeita a tração e compressão

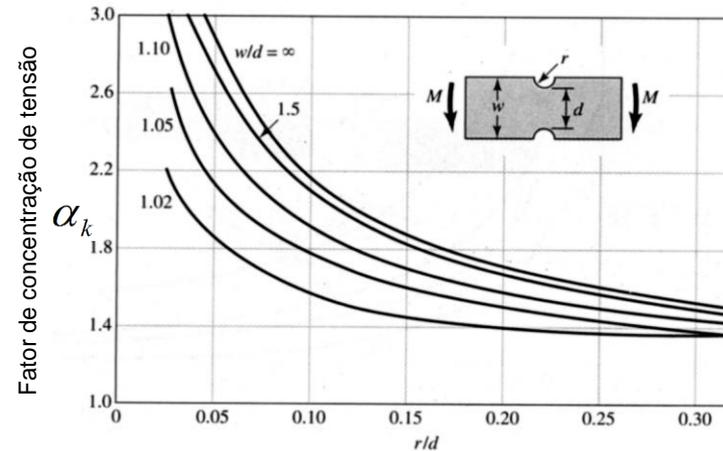


Figura 15 - Fator de concentração de tensão para uma barra retangular sujeita à flexão

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.)

SEM 0241 – ELEMENTOS DE MÁQUINAS I

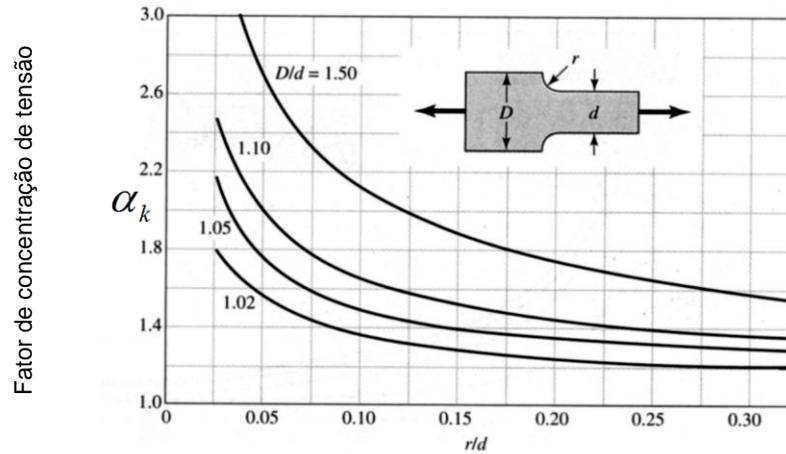


Figura 16 - Fator de concentração de tensão para uma barra com variação de secção sujeita a tração e compressão.

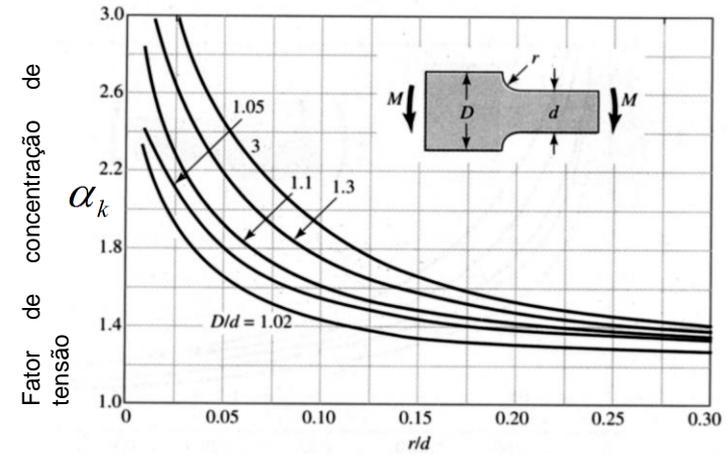


Figura 17 - Fator de concentração de tensão para uma barra com variação de secção sujeita a flexão.

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.)

SEM 0241 – ELEMENTOS DE MÁQUINAS I

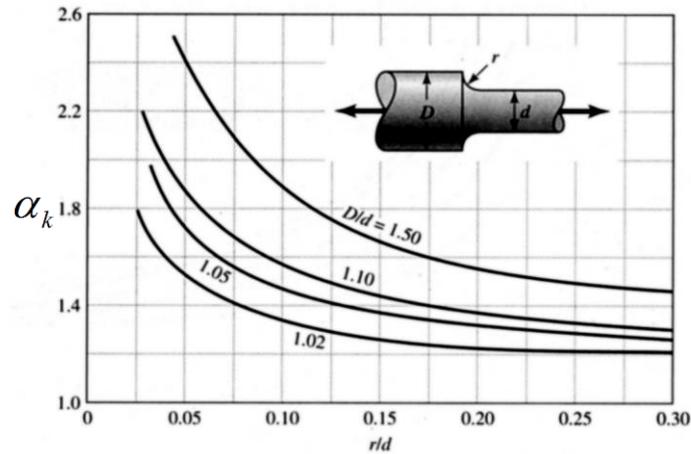


Figura 18 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular sujeito a tração

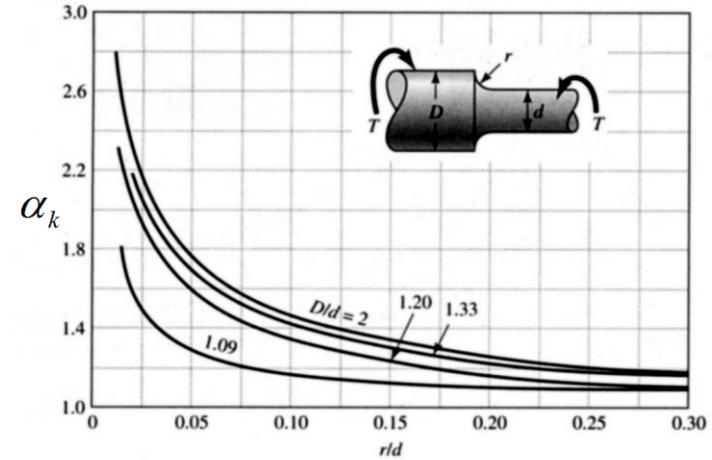


Figura 19 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular sujeito a torção

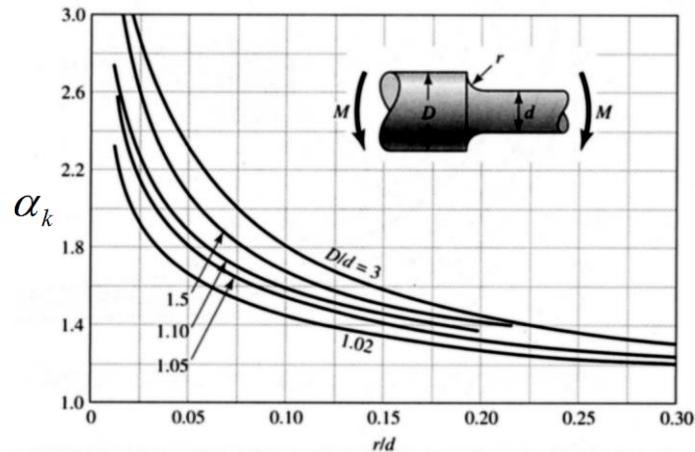


Figura 20 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular sujeito à flexão

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.)

SEM 0241 – ELEMENTOS DE MÁQUINAS I

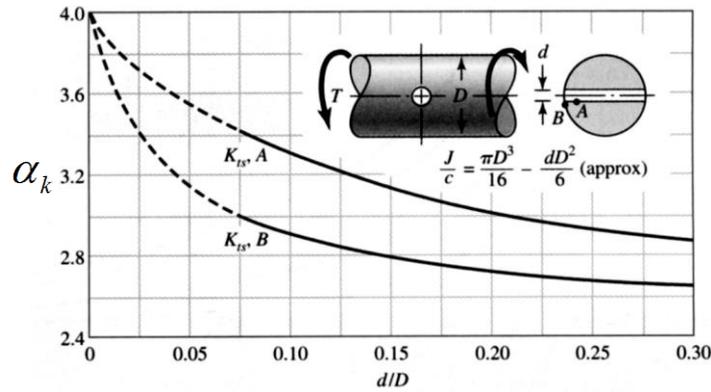


Figura 21 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com um furo, sujeito à flexão

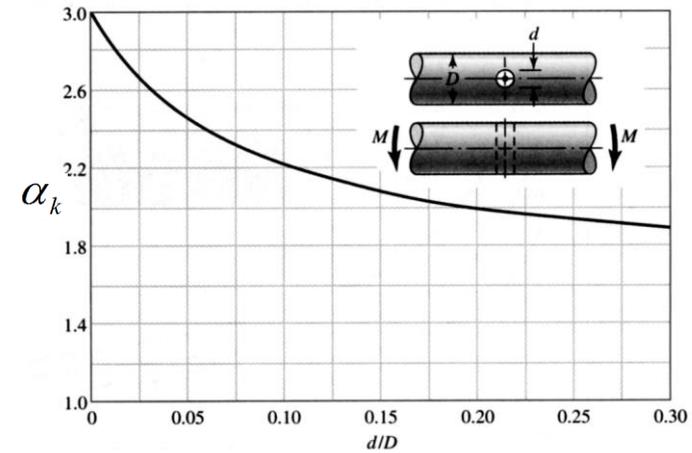


Figura 22 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com um furo, sujeito à torção

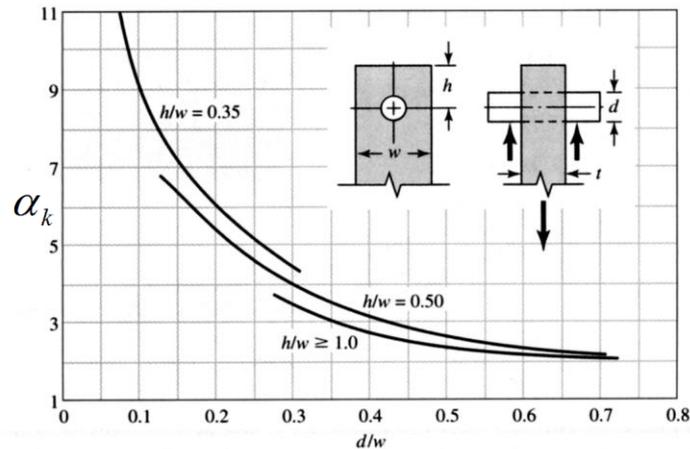


Figura 23 - Fator de concentração uma barra sujeita a tração através de um pino.

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.)

SEM 0241 – ELEMENTOS DE MÁQUINAS I

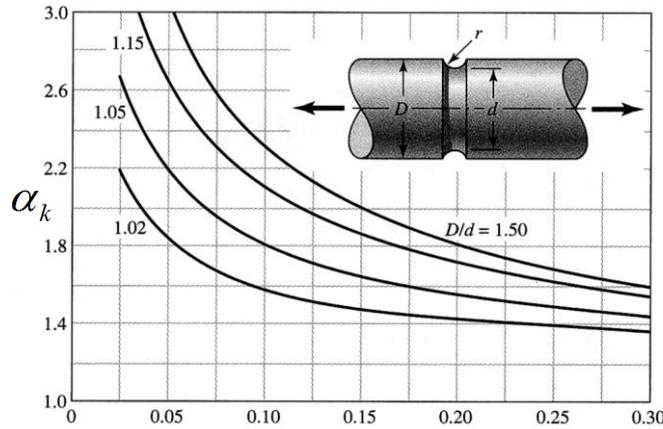


Figura 24 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com um rasgo arredondado, sujeito à tração.

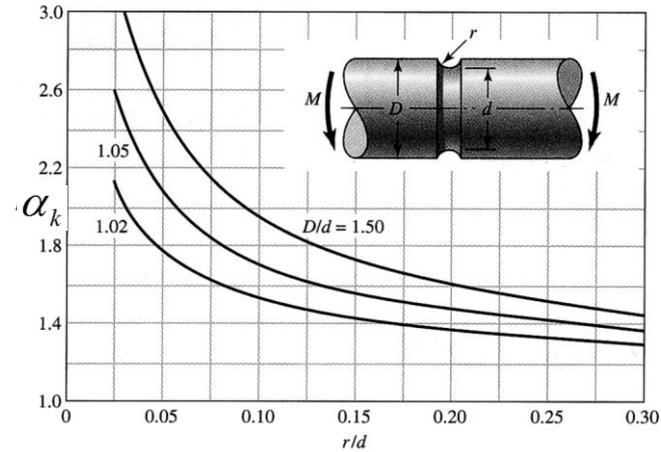


Figura 25 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com rasgo arredondado, sujeito à flexão.

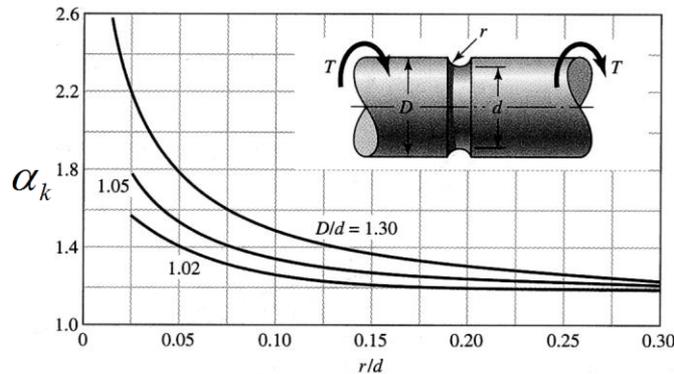
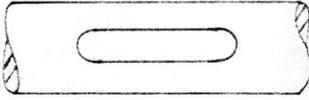
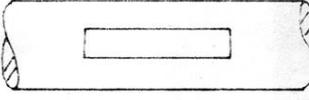
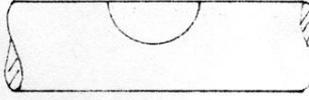


Figura 26 - Fator de concentração de tensão para eixo de seção circular, com rasgo arredondado, sujeito à torção.

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.)

Coeficiente de entalhe para solicitações dinâmicas para rasgos de chaveta:

1) Solicitação de flexão
alternada simétrica

A) RASGOS COM FRESA DE TOPO	VALORES DE β (β_{kt})	
	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)	VALORES DE β	
	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

Figura 27

$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5$: Coeficientes de Segurança

- η_1 : Leva em conta as incertezas de dados metalúrgicos e tratamentos térmicos $1,0 \leq \eta_1 \leq 1,2$

- η_2 : Hipóteses simplificadoras $1,25 \leq \eta_2 \leq 1,5$ Incertezas quanto ao β_k
 $1,1 \leq \eta_2 \leq 1,25$ Incertezas de solicitação, modelo, carga e vínculos.

- η_3 : Importância da falha da peça $1,0 \leq \eta_3 \leq 1,25$

- η_4 : Incerteza da determinação do valor das cargas $1,0 \leq \eta_4 \leq 1,2$

- η_5 : Leva em conta choques e sobrecargas

Grupo	Tipo de Choque	η_5
I	Leves	1,0 a 1,1
II	Médios	1,2 a 1,5
III	Fortes	1,5 a 2,0
IV	Muito Fortes	2,0 a 3,0

Conhecido o valor da tensão admissível de fadiga S_{Fadm} , está terminado o estudo de fadiga

Outros Modelos:

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

Adotado por : Shigley, J. E. et al. *Mechanical Engineering Design*.
Norton R. L. *Projeto de máquinas*

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1}$$

onde:

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 confiabilidade;

k_f = fator de modificação por efeitos variados

S'_e = limite de resistência do cp em ensaio rotativo

S_e = limite de resistência a fadiga

onde:

k_t = fator de concentração de tensão; (tabelado)

q = sensibilidade ao entalhe

* MARIN J. *Mechanical behaviour of engineering materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1962, p.224.