

Exercício extra 2

Cargas conhecidas e choques leves.

Temperatura de trabalho de 40°C .

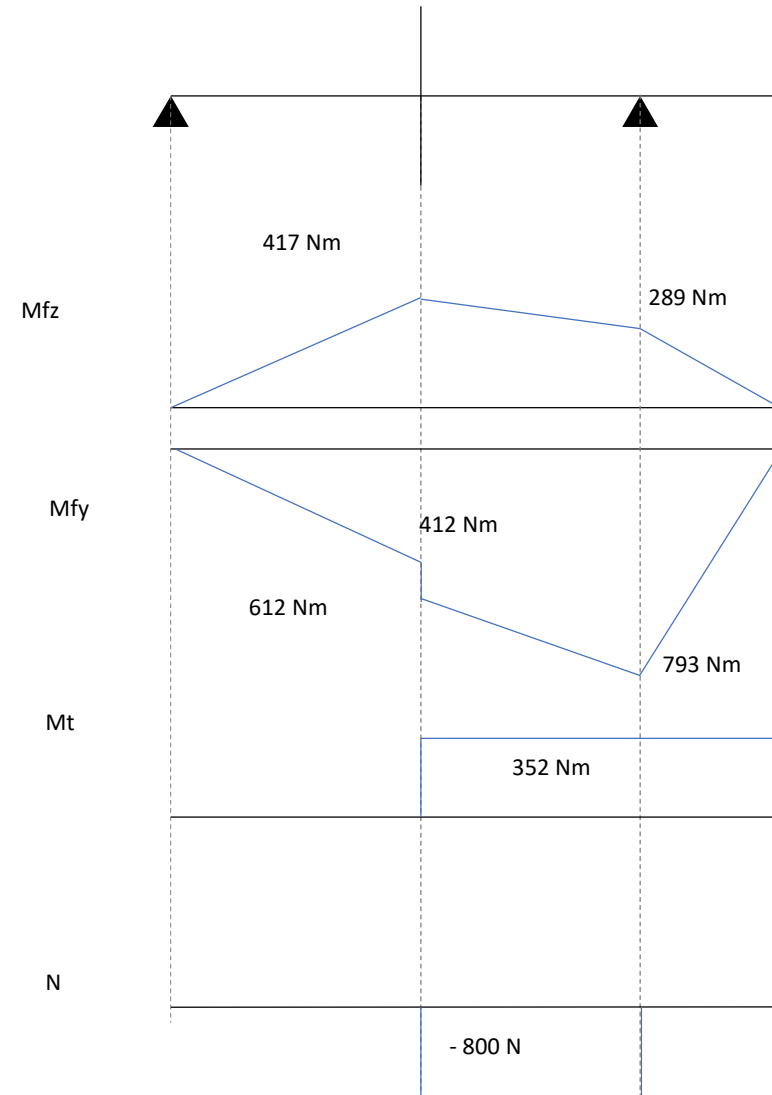
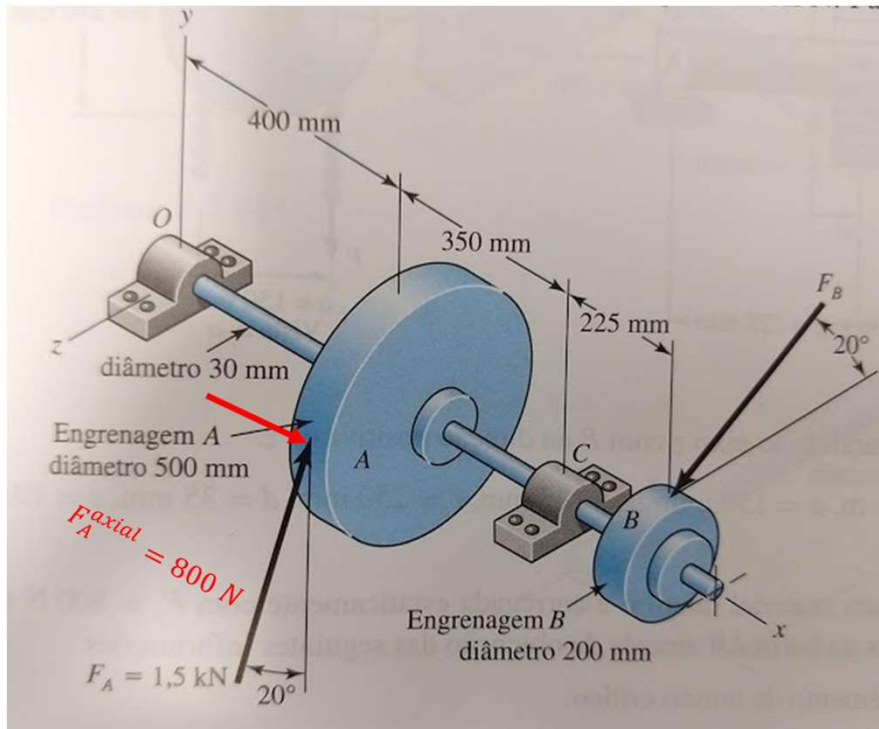
Largura das engrenagens de 50 mm (com chaveta)

Largura dos rolamentos de 20 mm (assento retificado)

Material aço 1020 estirado a frio

($\sigma_{ut} = 470 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 370 \text{ MPa}$, dureza 131 HB).

Mancal C resiste a carga axial.



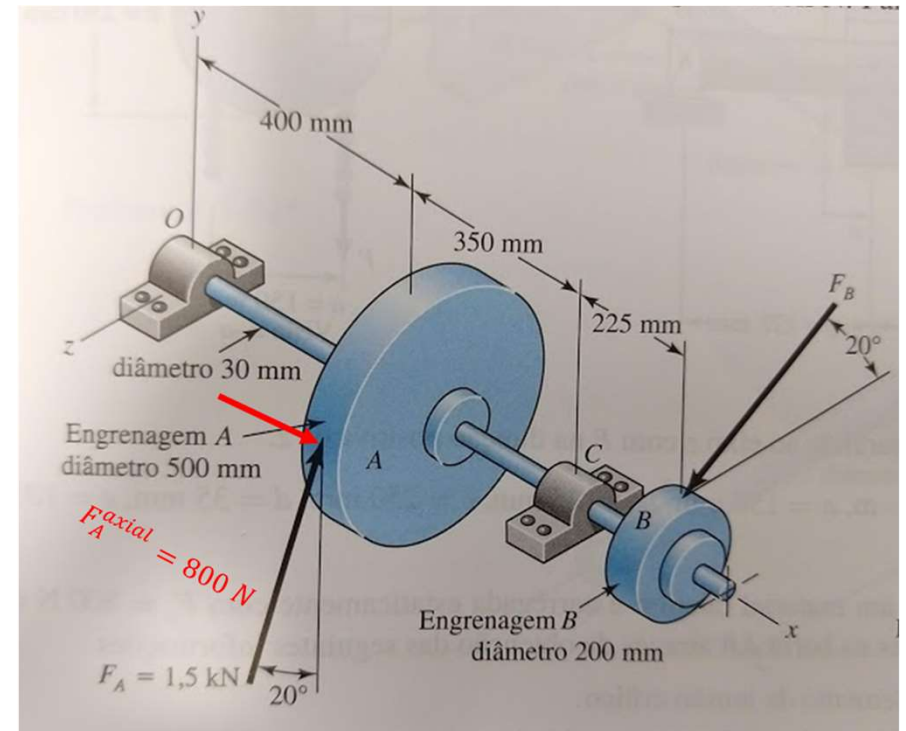
a) Croqui preliminar do eixo

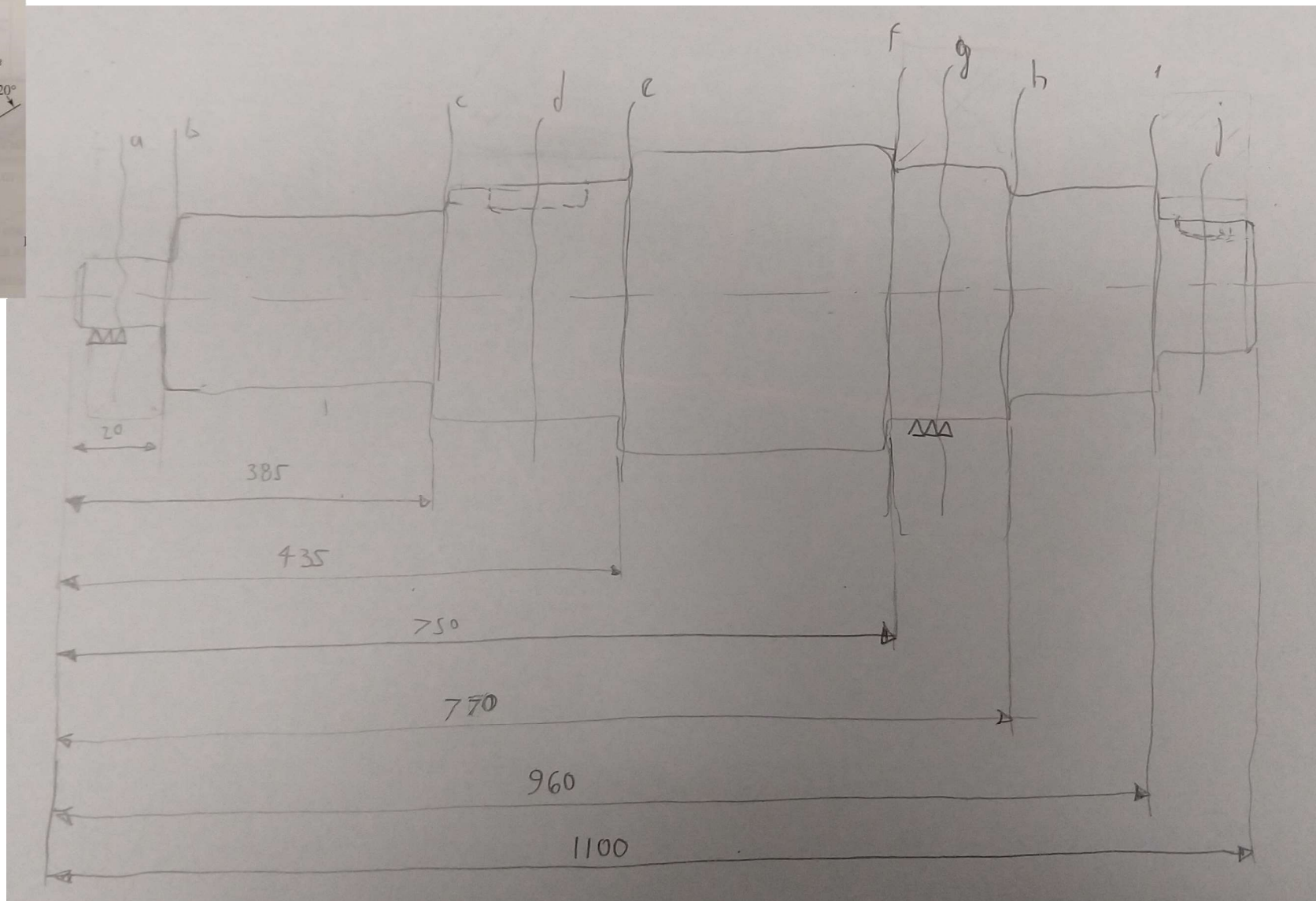
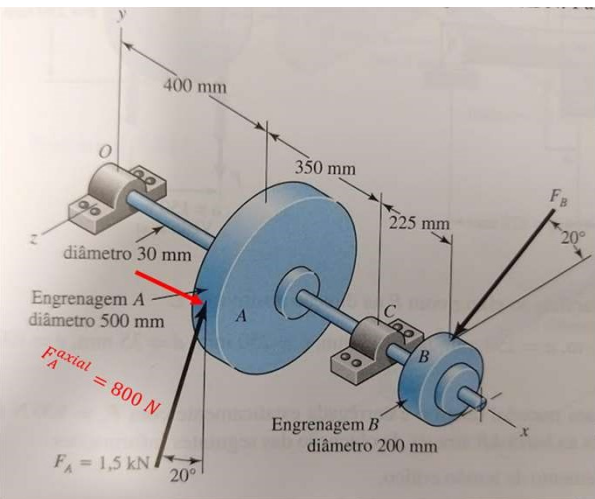
Largura das engrenagens de 50 mm (com chaveta)

Largura dos rolamentos de 20 mm (assento retificado)

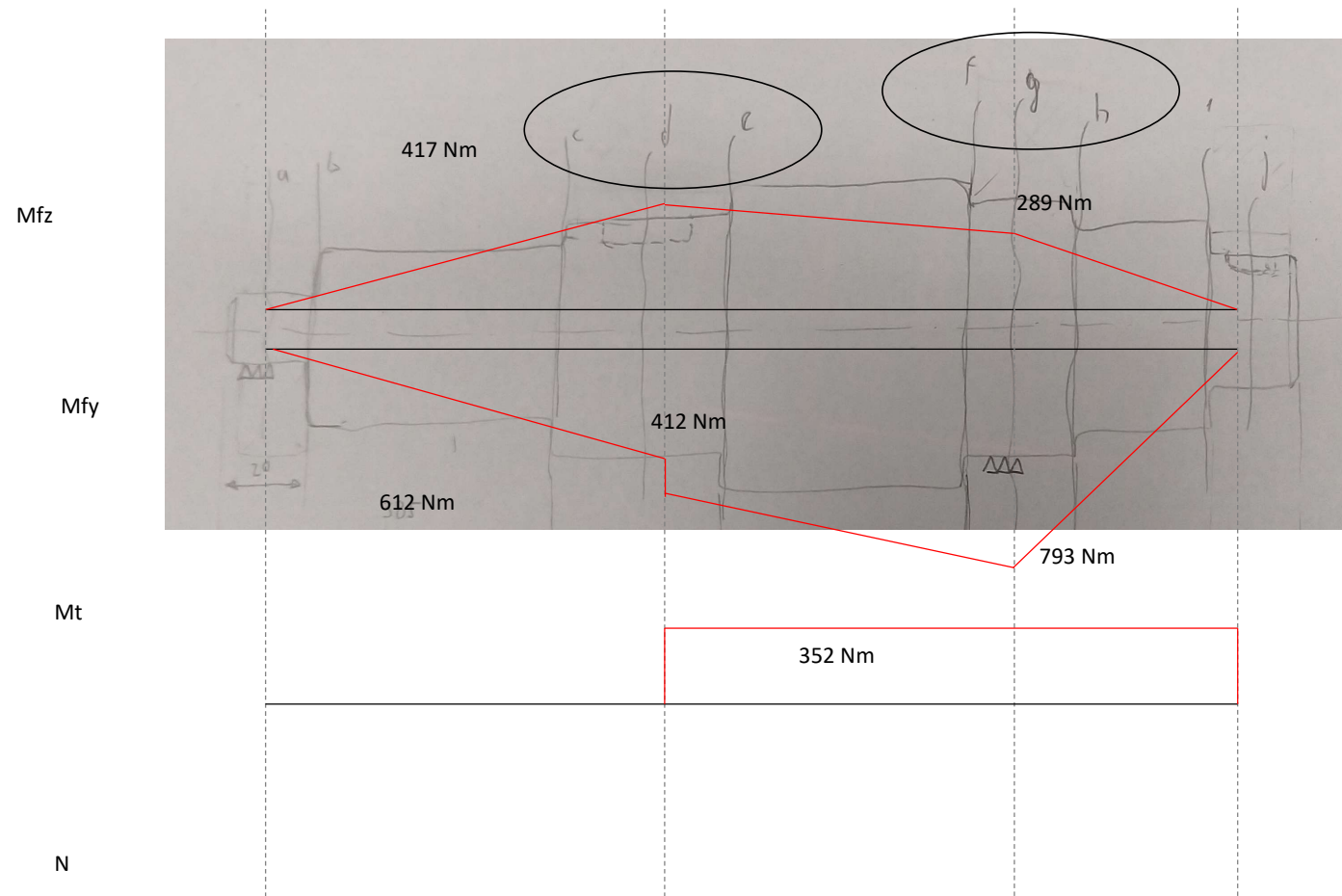
Material aço 1020 estirado a frio

($\sigma_{ut} = 470 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 370 \text{ MPa}$, dureza 131 HB). Mancal C resiste a carga axial.

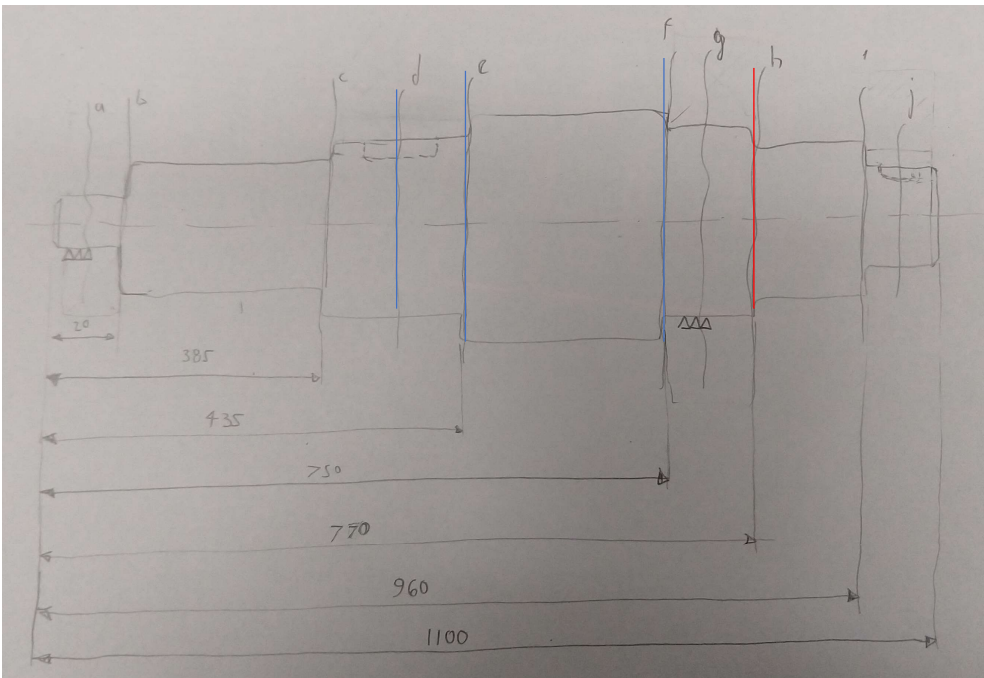




b) Potenciais seções críticas.



b) Potenciais seções críticas.



Comparar duas a duas

$$M_{fr} = \sqrt{M_{fz}^2 + M_{fy}^2}$$

$$M_{eq} = \sqrt{M_{fr}^2 + \frac{3}{4}M_t^2}$$

	posição	Mfz	Mfy	Mt	N	Mfr	Meq
		Nm	Nm	Nm	N	Nm	Nm
a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
b	10.0	10.4	10.3	0.0	0.0	14.7	14.7
c	375.0	390.9	386.3	0.0	0.0	549.6	549.6
d	400.0	417.0	612.0	352.0	-800.0	740.6	800.9
e	425.0	407.9	624.9	352.0	-800.0	746.2	806.1
f	740.0	292.7	787.8	352.0	-800.0	840.4	894.0
g	750.0	289.0	793.0	352.0	-800.0	844.0	897.4
h	760.0	276.2	757.8	352.0	0.0	806.5	862.2
i	950.0	32.1	88.1	352.0	0.0	93.8	318.9
j	975.0	0.0	0.0	352.0	0.0	0.0	304.8

Vou analisar a seção h

Mas também vou vigiar as seções d – e – f

c) Pré-dimensionamento estático

- Tensão admissível
 - Material dúctil x1,5 (x2)
 - Carga variável com reversão x3
 - Concentrador de tensão x2

Aqui eu usei a criatividade e já previ o concentrador de tensão

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{s}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{370}{1,5 * 3 * 2} = 41,1 \text{ MPa}$$

Carga constante :	b = 1.0
Variável sem reversão :	b = 1.5 ~ 2.0
Variável com reversão :	b = 2.0 ~ 3.0
{ material dúctil :	d = 1.5 ~ 2.0
{ material frágil :	d = 2.0 ~ 3.0

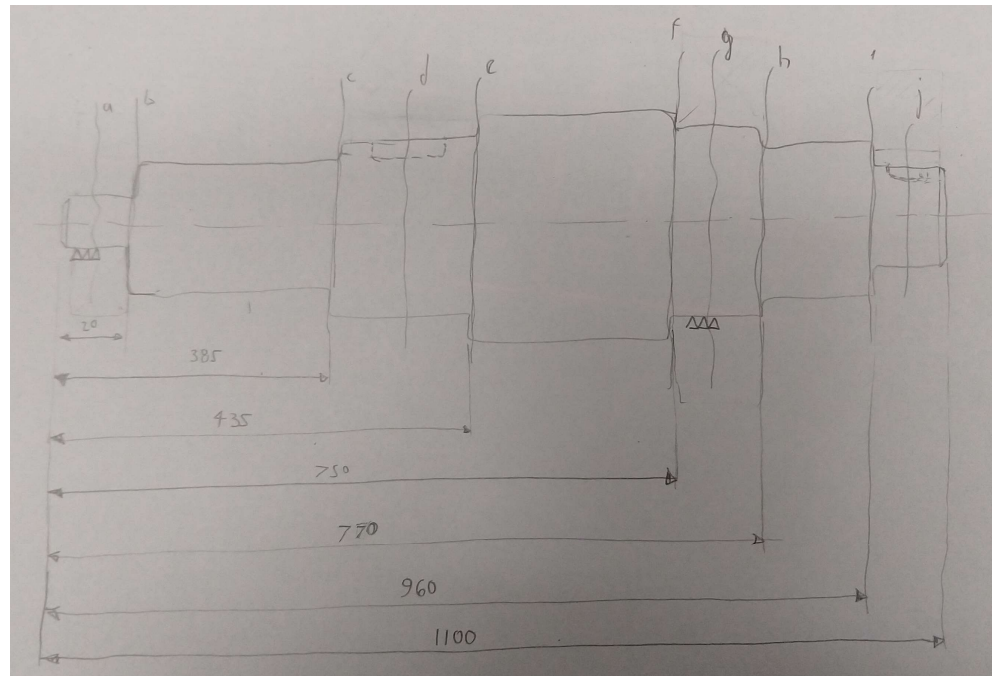
c) Pré-dimensionamento estático

$$\sigma_{adm} = \frac{M_{eq}}{\frac{\pi d^3}{32}} \quad \bar{d} = 2,17 \sqrt[3]{\frac{M_{eq}}{\sigma_{adm}}}$$

$$d_0 = 1,1 \sim 1,3 \bar{d}$$

	Meq	d_{est}	d₀
	Nm	mm	mm
a	0.0	0.0	55
b	14.7	15.4	55
c	549.6	51.4	65
d	800.9	58.3	70
e	806.1	58.5	70
f	894.0	60.5	70
g	897.4	60.6	70
h	862.2	59.8	65
i	318.9	42.9	55
j	304.8	42.3	55

$D_{max} = 75 \text{ mm}$



Quais dados usar para fadiga?

Qualidade dos dados (em ordem decrescente)

- Ensaio da peça nas condições reais
- Ensaio do material da peça em fadiga
- Dados do fabricante ou literatura sobre o material em fadiga
- Estimativa baseado no ensaio de tração

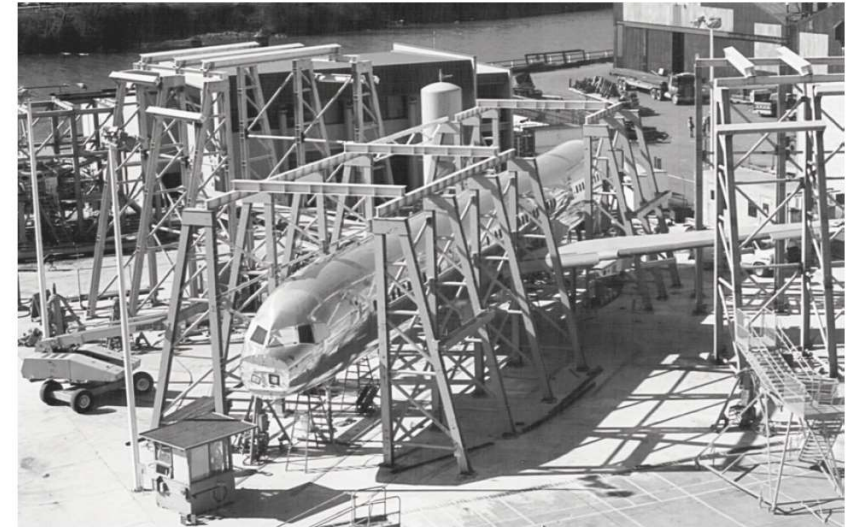


FIGURA 6-22

Norton 4ed

Conjunto com instrumentação construído para permitir ensaios de fadiga das montagens da asa e da fuselagem de um avião Boeing 757. (Cortesia da Boeing Commercial Airplane Co., Seattle, Wash.)

d) Limite à fadiga alternada corrigida (vida infinita)

Aço 1020 estirado a frio

($\sigma_{ut} = 470 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 370 \text{ MPa}$, dureza 131 HB).

Shigley/Norton

$$S'_e = 0,5\sigma_{ut} \quad \text{para } \sigma_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 700 \text{ MPa} \quad \text{para } \sigma_{ut} > 1400 \text{ MPa}$$

Niemann

$$S'_e = 0,45\sigma_{ut}$$

S'_e (MPa)	1020
Niemann	211,5
Shigley/Norton	235
Apostila Fadiga	250

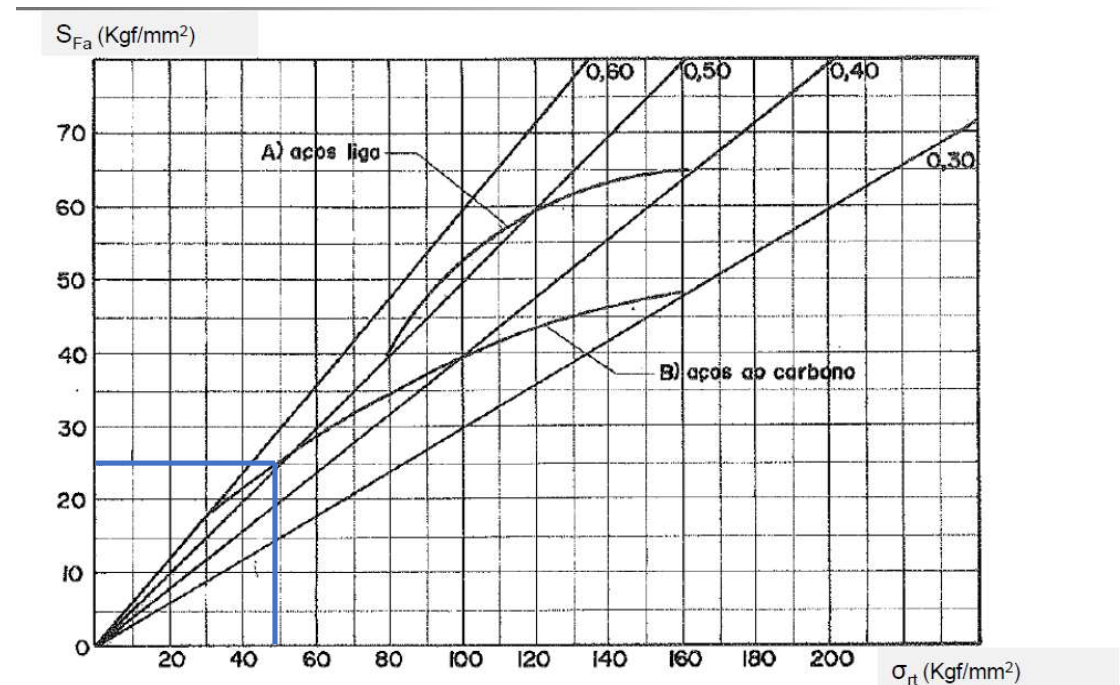


Figura 1 - Curvas do limite de resistência à fadiga alternada simétrica de FLEXÃO (Pura e mista) para aços em função da tensão de ruptura a Tração.

d) Limite à fadiga alternada corrigida (vida infinita)

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

$$S_e = C_{superfície} C_{tamanho} C_{carregamento} C_{temperatura} C_{confiabilidade} C_{outros} S'_e$$

$C_{\text{superfície}} k_a$

k_a	Usinado	Retificado
Formula Shigley	0,88	0,94
Grafico Norton	0,79	0,9
Apostila Fadiga	0,9	0,97

Aço 1020 estirado a frio
($\sigma_{ut} = 470 \text{ MPa}$).

Shigley

Acabamento	A	b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado/estirado à frio	4,51	-0,265
Laminado à quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

$$k_a = A(S_{ut})^b$$

S_{ut} em MPa

OU

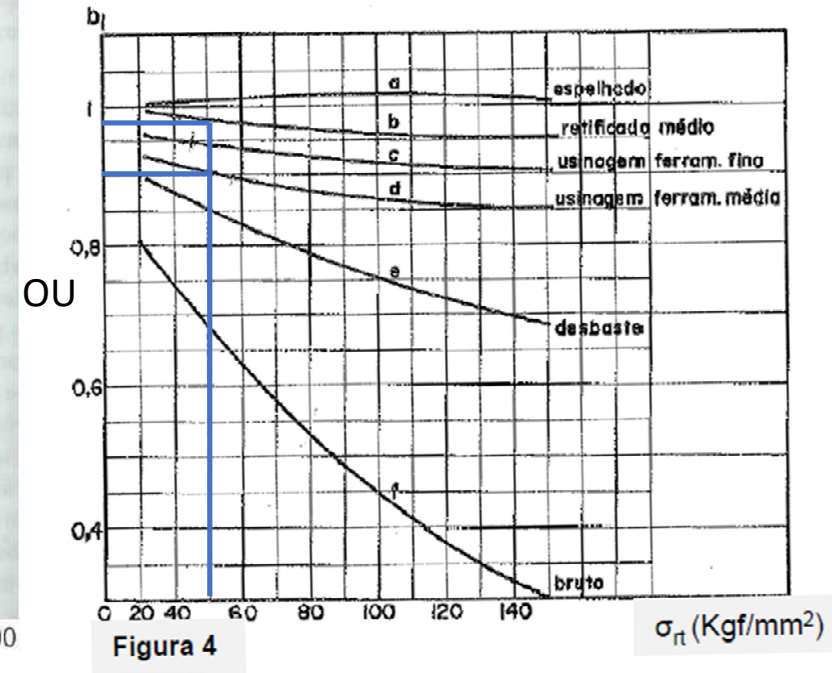
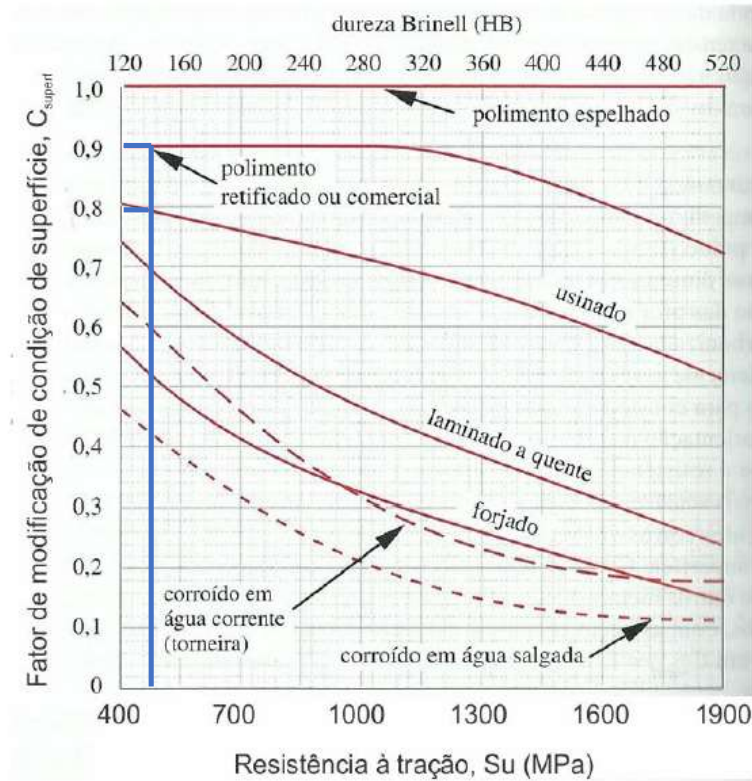


Figura 4

$C_{\text{tamanho}} K_b$

Assumindo $d = 70 \text{ mm}$ (maior)

	k_b
Formula Norton	0,79
Formula Shigley	0,77
Niemann	0,66
Apostila Fadiga	0,80

• Norton

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

$$C_{\text{tamanho}} = 1$$

$$C_{\text{tamanho}} = 1,189 \cdot d^{-0,097}$$

$$C_{\text{tamanho}} = 0,6$$

• Shigley

para $2,79 \text{ mm} \leq d \leq 51 \text{ mm}$:
 para $51 \text{ mm} < d \leq 254 \text{ mm}$:

$$k_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

$$k_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$$

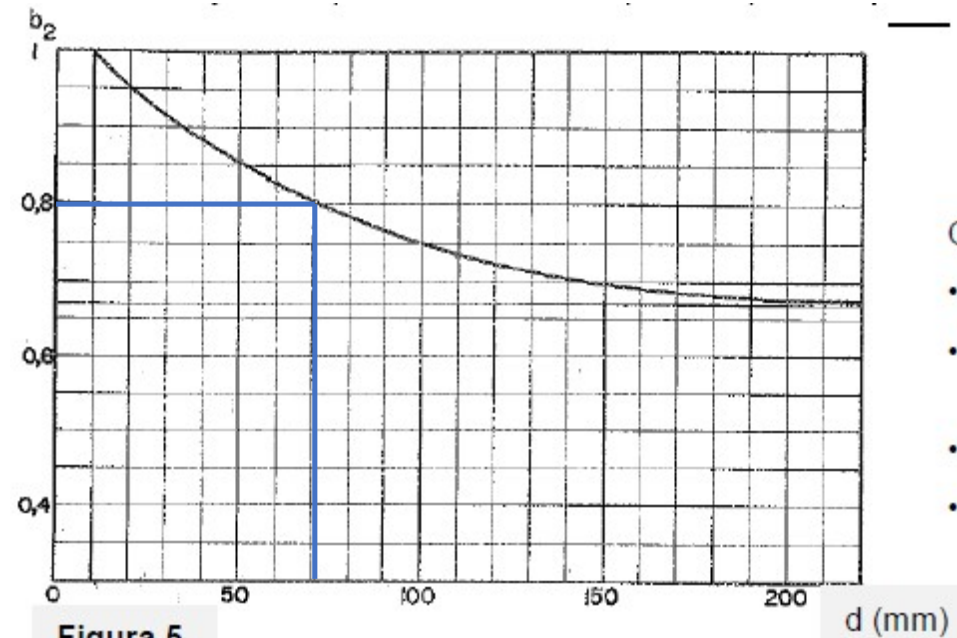


Figura 5

Niemann

d (mm)	10	20	30	50	100	200	250	300
k_b	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,57	0,56	0,56

$C_{\text{carregamento}} K_c$

	Shigley	Norton
Flexão e flexo torção	1	1
Axial = 0,9 axial para Fofa	0,85 (divide a carga axial por esse valor quando tem cargas combinadas)	0,7 (usa se tiver qualquer carga axial)
Torção pura (comparando τ com S_e flexão)	0,59	0,577
Torção pura (comparando σ_{Mises} com S_e flexão) (comparando τ com S_e torção)	1	1

Flexo torção

$$k_c = 1$$

C_{temperatura} k_d

Somente para aços

- Norton

um fator de temperatura C_{temp} . Shigley e Mitchell^[21] sugerem o seguinte:

para $T \leq 450^\circ\text{C}$ (840°F): $C_{temp} = 1$

para $450^\circ\text{C} < T \leq 550^\circ\text{C}$: $C_{temp} = 1 - 0,0058(T - 450)$ (6.7f)

para $840^\circ\text{F} < T \leq 1020^\circ\text{F}$: $C_{temp} = 1 - 0,0032(T - 840)$

$$K_d = 1$$

- Shigley (10th edition) – de 20 a 600°C

$$k_d = 0,975 + 0,332(10^{-3})T_F - 0,115(10^{-5})T_F^2 + 0,104(10^{-8})T_F^3 - 0,595(10^{-12})T_F^4$$

- Nieman

- $K_d = 1$ até 350°C

	k _d
Formula Norton	1
Formula Shigley	1
Nieman	1

$C_{\text{confiabilidade}}$ k_e

- Norton e Shigley

Tabela 6-4

Fatores de confiabilidade para $S_d = 0,08\mu$

Confiabilidade %	C_{conf}
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

$$K_e = 0,814$$

d) Limite à fadiga alternada corrigida (vida infinita)

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

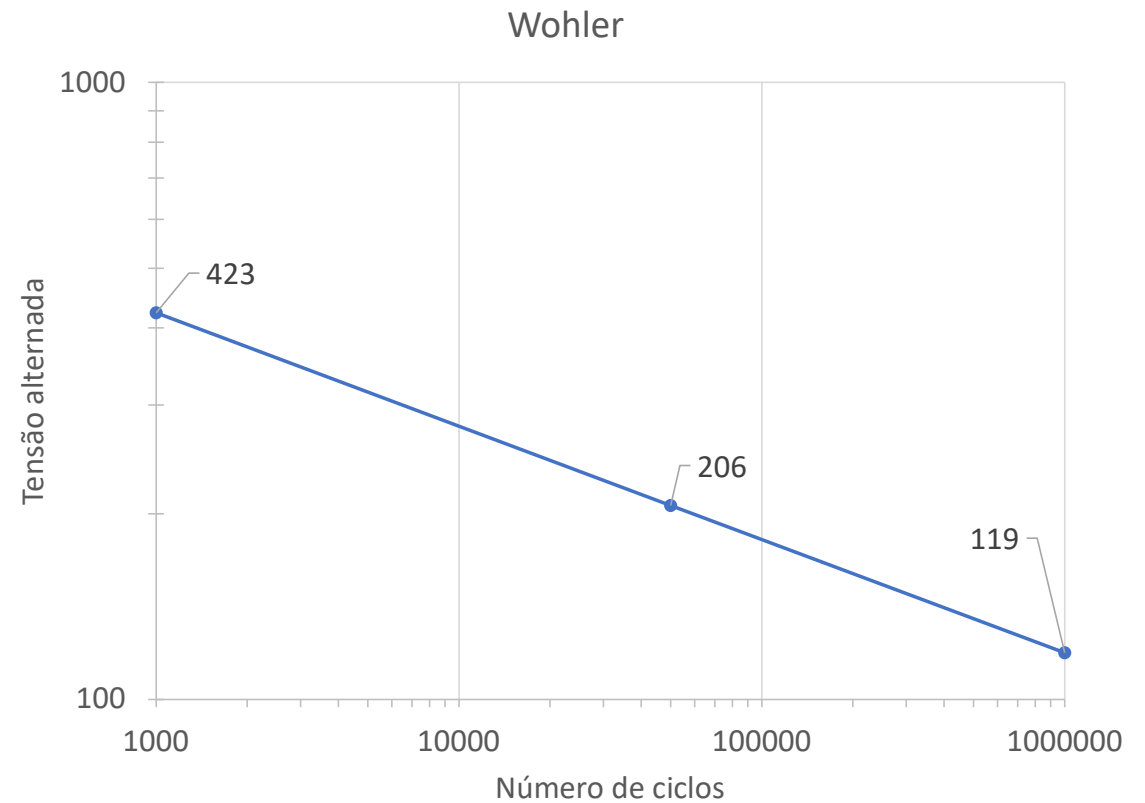
$$S_e = 0,79 * 0,79 * 1 * 1 * 0.814 * 235 = 119 \text{ MPa}$$

e) Limite à fadiga alternada corrigida (5×10^4 ciclos)

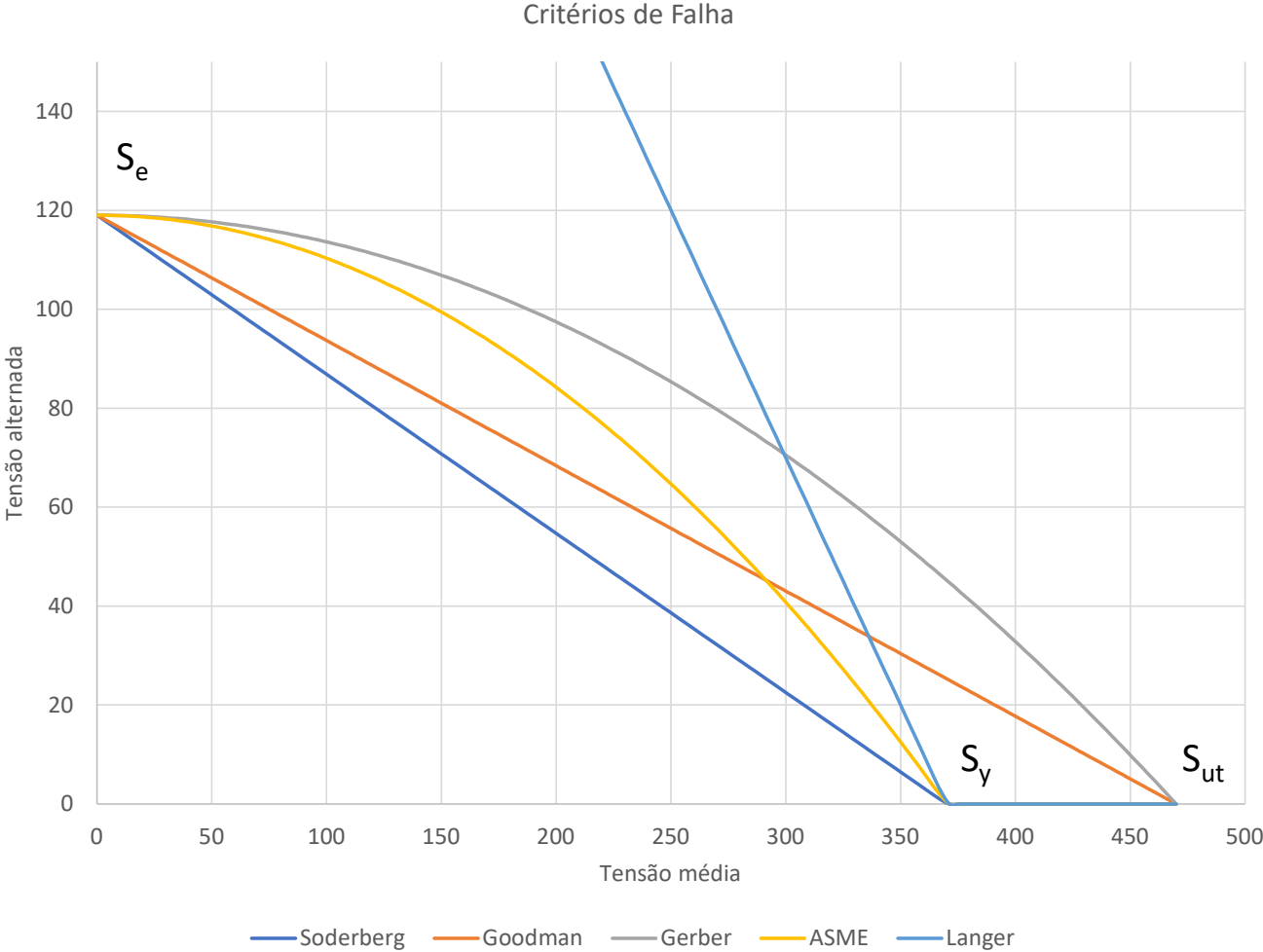
Semelhança de triângulos

$$S_n = S_e * 10^{\left(\frac{\left(\log \frac{S_{1000}}{S_e} * \log \frac{N_e}{N} \right)}{\log \left(\frac{N_e}{1000} \right)} \right)}$$

$$S_{1000} = f S_{ut} \approx 0,9 S_{ut}$$



f) Critérios de falha



g) Coeficiente de segurança

$$CS_0 = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4 * \eta_5$$

$$CS_0 = 1,1 * 1,25 * 1,25 * 1 * 1,2 = 2$$

Niemann

- 1,2 a 2,0 quando depende de fadiga?
- 1,1 a 1,8 quando depende de escoamento
- 1,8 a 2,5 quando depende de ruptura
- 3 a 6 quando depende da velocidade crítica

$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5$: 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 $1,25 \leq \eta_2 \leq 1,5$
 $1,1 \leq \eta_2 \leq 1,25$ Incertezas quanto ao β_x ,
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

h) Concentração de tensão

$$\sigma = \beta_f \sigma_{nom}$$

$$\tau = \beta_t \tau_{nom}$$

Entalhe – sensibilidade (por fórmula)

\sqrt{a} = constante de Neuber do material

Flexão e axial: $\sqrt{a} = 0,246 - 3,08(10^{-3})S_{ut} + 1,51(10^{-5})S_{ut}^2 - 2,67(10^{-8})S_{ut}^3$

torção: $\sqrt{a} = 0,190 - 2,51(10^{-3})S_{ut} + 1,35(10^{-5})S_{ut}^2 - 2,67(10^{-8})S_{ut}^3$

Unidade em inches e kpsi

$$S_{ut} = 470 \text{ MPa} = 68,1 \text{ kpsi}$$

$$r = 1 \text{ mm} = 0.03937 \text{ in}$$

$$\text{Flexão: } \sqrt{a} = 0,0978 \sqrt{\text{in}}$$

$$\text{Torção: } \sqrt{a} = 0,0732 \sqrt{\text{in}}$$

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

$$\text{Flexão: } q = 0,6699$$

$$\text{Torção: } q_s = 0,7306$$

Tabela 6-6

Constante de Neuber para aços

S_{ut} (ksi)	\sqrt{a} (in ^{0,5})
50	0,130
55	0,118
60	0,108
70	0,093
80	0,080
90	0,070
100	0,062
110	0,055
120	0,049
130	0,044
140	0,039
160	0,031
180	0,024
200	0,018
220	0,013
240	0,009

Entalhe – sensibilidade (ou por gráfico)

$$S_{ut} = 470 \text{ MPa} = 68,1 \text{ kpsi}$$

$$r = 1 \text{ mm} = 0.03937 \text{ in}$$

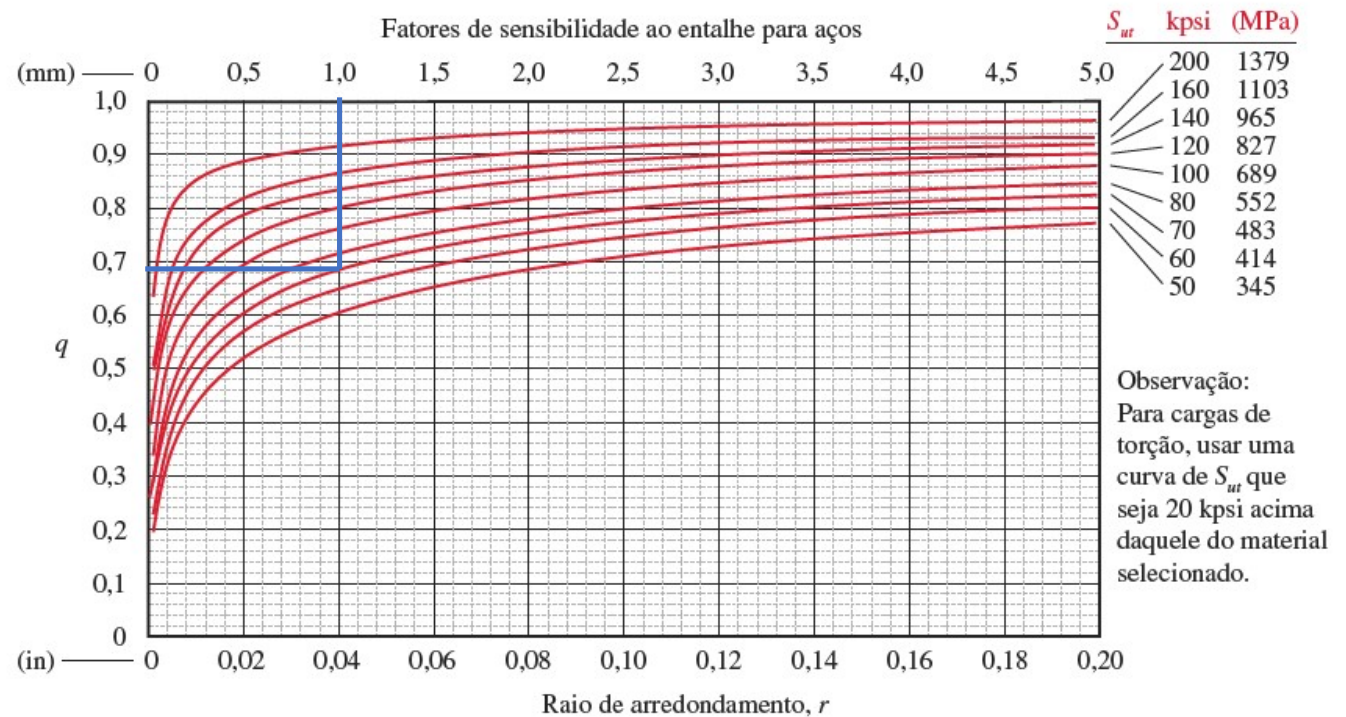
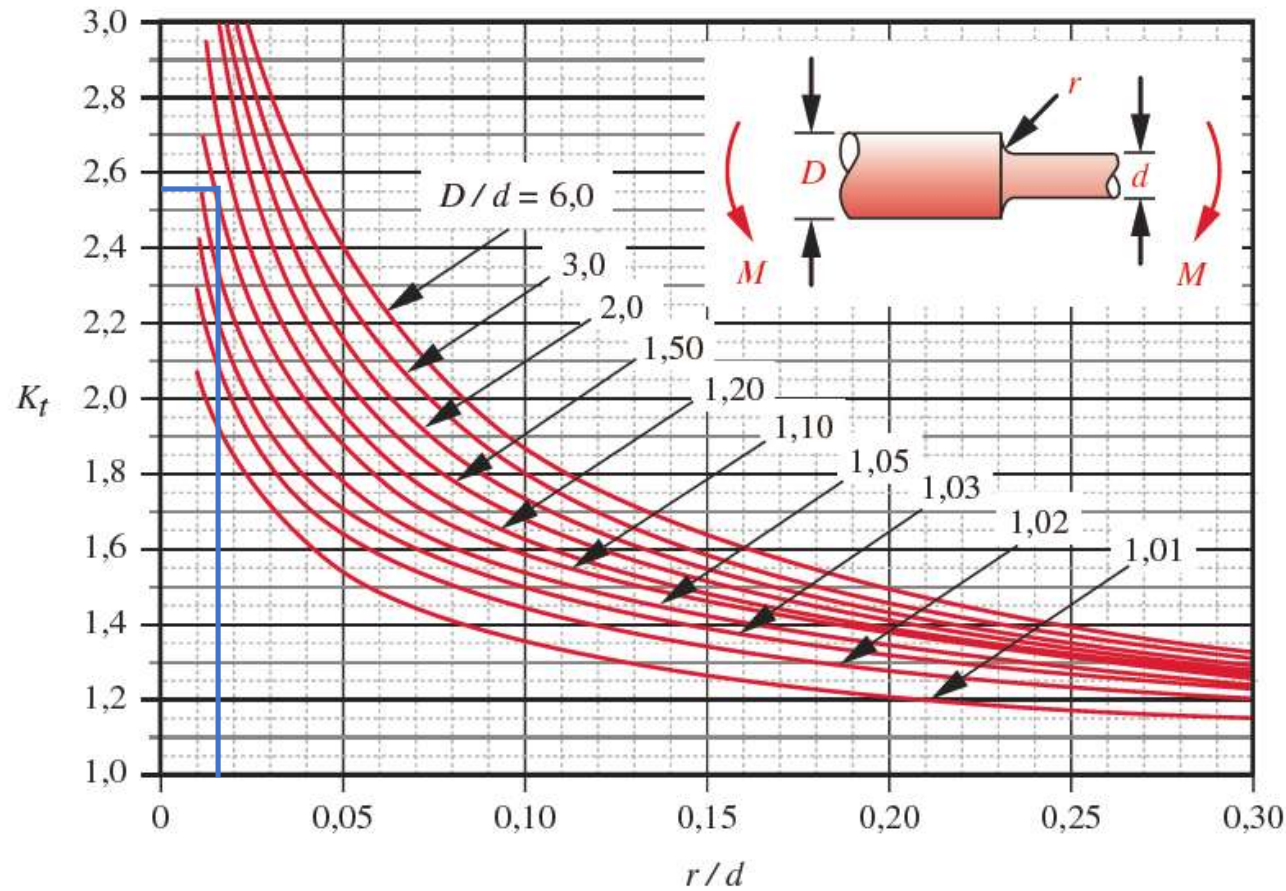


FIGURA 6-36 Parte 1

Curvas de sensibilidade ao entalhe para aços calculadas a partir da Equação 6.13 com os dados da Figura 6-35, como originalmente proposto por R. E. Peterson em "Notch Sensitivity", Capítulo 13 em *Metal Fatigue* by G. Sines and J. Waisman, McGraw-Hill, New York, 1959.

$r = 1 \text{ mm}$
 $D = 65 \text{ mm}$
 $d = 60 \text{ mm}$
 $r/d = 0.015$
 $D/d = 1.08$



$$K_t \cong A \left(\frac{r}{d} \right)^b$$

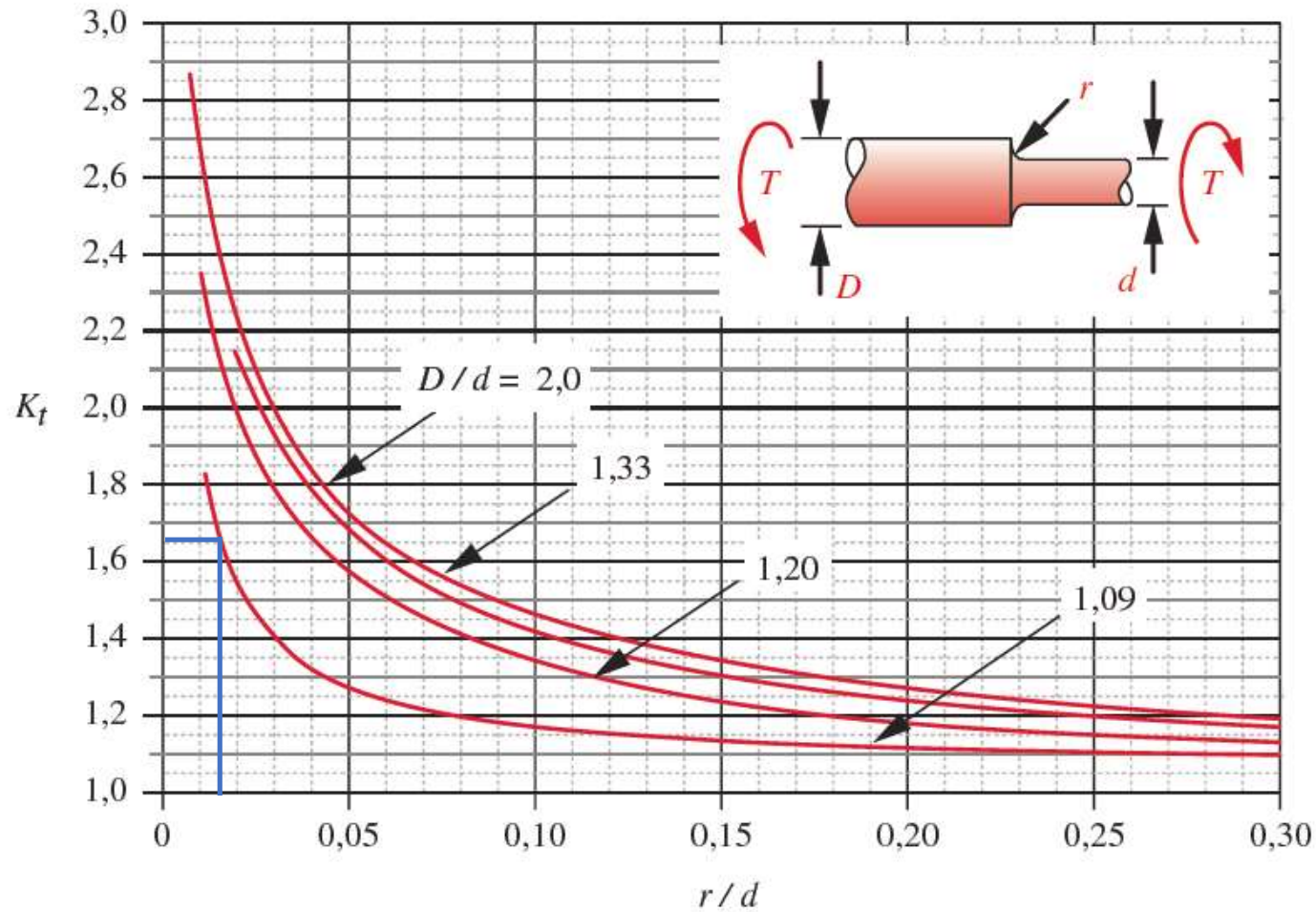
onde:

D/d	A	b
6,00	0,87868	-0,33243
3,00	0,89334	-0,30860
2,00	0,90879	-0,28598
1,50	0,93836	-0,25759
1,20	0,97098	-0,21796
1,10	0,95120	-0,23757
1,07	0,97527	-0,20958
1,05	0,98137	-0,19653
1,03	0,98061	-0,18381
1,02	0,96048	-0,17711
1,01	0,91938	-0,17032

FIGURA C-2

Fator geométrico de concentração de tensão K_t para um eixo com um rebaixo arredondado em flexão.

$r = 1 \text{ mm}$
 $D = 65 \text{ mm}$
 $d = 60 \text{ mm}$
 $r/d = 0.015$
 $D/d = 1.08$



$$K_t \cong A \left(\frac{r}{d} \right)^b$$

onde:

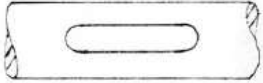
D/d	A	b
2,00	0,86331	-0,23865
1,33	0,84897	-0,23161
1,20	0,83425	-0,21649
1,09	0,90337	-0,12692

FIGURA C-3

Fator geométrico de concentração de tensão K_t para um eixo com um rebaixo arredondado em torção.

Kf - chaveta

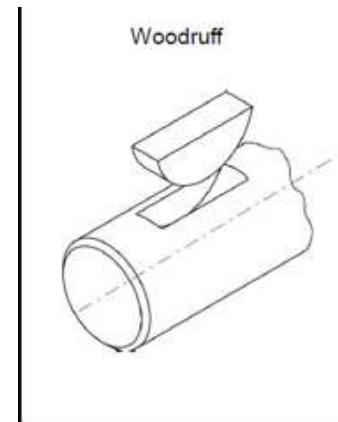
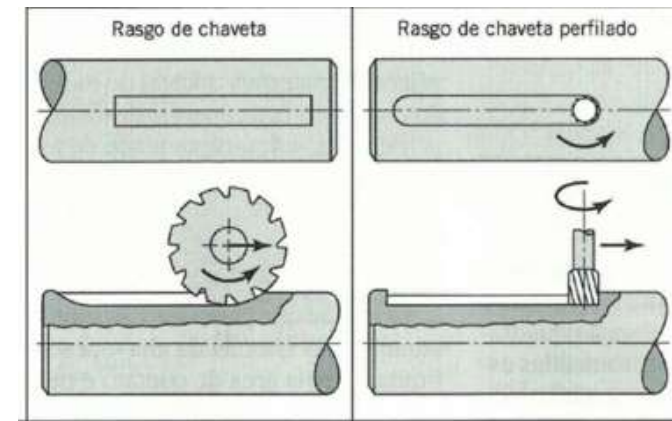
1) Solicitação de flexão alternada simétrica

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) QUALQUER TIPO DE RASGO EXCETO AMERICANA	VALORES DE β	
	EIXO AÇO CARBONO	EIXO AÇO CARBONO TRATADO OU AÇO-LIGA
	1,3	1,6
B) RASGO AMERICANA	1,6	2,0

Figura 27



h) Concentração de tensão

$$\beta_f = 1 + q(\alpha_f - 1)$$

$$\beta_t = 1 + q_s(\alpha_t - 1)$$

Seção	α_f	β_f	α_t	β_t
d		1.60		1.30
e	1.65	1.44	1.55	1.40
f	2.40	1.94	1.55	1.40
h	1.65	1.44	1.53	1.39

i) Tensão de confronto

Shigley/Norton

$$\sigma'_a = \sqrt{\left[\beta_f \sigma_{af} + \frac{\beta_f \sigma_{aa}}{0,85}\right]^2 + 3[\beta_t \tau_a]^2}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{[\beta_f \sigma_{mf} + \beta_f \sigma_{ma}]^2 + 3[\beta_t \tau_m]^2}$$

Niemann*

$$\sigma^* = \beta_f \sqrt{\sigma_{max}^2 + H^2 \tau^2}$$

$$H = \frac{S_e \beta_t}{\tau_y \beta_f}$$

Shigley/Norton

$$\sigma'_a = \beta_f \sigma_f$$

$$\sigma'_m = \sqrt{[\beta_f \sigma_a]^2 + 3[\beta_t \tau]^2}$$

Niemann*

$$\sigma^* = \beta_f \sqrt{[\sigma_f + \sigma_a]^2 + H^2 \tau^2}$$

$$H = \frac{S_e \beta_t}{\tau_y \beta_f}$$

$$\sigma_f = \left(\frac{32M_f}{\pi d^3}\right)$$

$$\sigma_a = \left(\frac{4N}{\pi d^2}\right)$$

$$\tau = \left(\frac{16M_f}{\pi d^3}\right)$$

$$CS_{apostila} = \sigma_{adm} / \sigma^*$$

$$CS_{ASME} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{S_y}\right)^2}}$$

Poderia usar outro critério (Goodman por exemplo)

SUPERDIMENSIONADO
 $CS > CS_0$

	Sigma_f	Sigma_N	Tau	Sigma_m	Sigma_a	Sigma*	n Apostila	n ASME
a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-
b	0.7	0.0	0.0	0.0	1.3	1.3	106.4	106.4
c	20.4	0.0	0.0	0.0	38.7	38.7	3.1	3.6
d	22.0	-0.2	5.2	11.8	35.2	36.3	3.3	3.9
e	22.2	-0.2	5.2	12.7	31.8	33.1	3.6	4.3
f	25.0	-0.2	5.2	12.7	48.4	49.4	2.7	2.8
g	25.1	-0.2	5.2	9.1	25.1	25.9	5.2	5.4
h	29.9	0.0	6.5	15.7	42.9	44.1	2.7	3.2
i	4.4	0.0	8.3	19.8	6.3	14.2	8.5	14.1
j	0.0	0.0	8.3	18.7	0.0	12.0	10.0	19.8

+Crítica

j) Iterações

Verificar somente para seção f

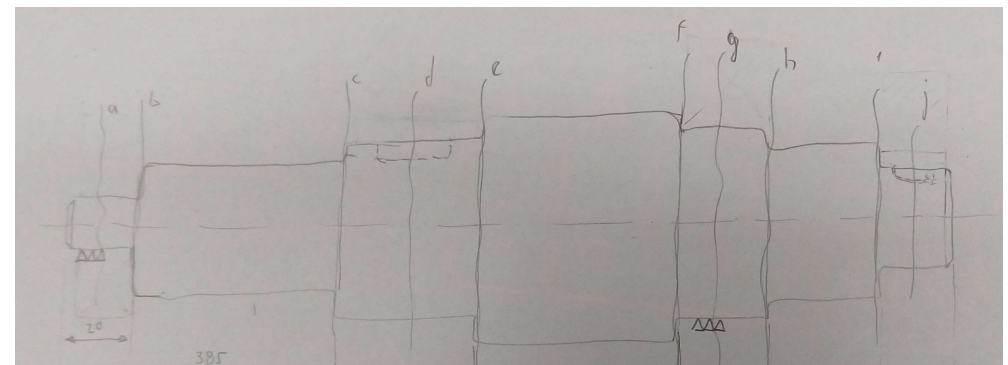
$$d_{novo} \approx d_{velho} \sqrt[3]{\frac{\sigma^*}{S_e} \frac{CS_0}{CS}} = d_{velho} \sqrt[3]{CS_0/CS}$$

$$d_{novo} \approx 62.3$$

Adotarei $d_{novo} = 65$

	d_0	d_1
	mm	
a	55	55
b	55	55
c	65	60
d	70	65
e	70	65
f	70	65
g	70	65
h	65	60
i	55	55
j	55	55

$$D_{max} = 70 \text{ mm}$$



j) Iterações

O que muda?

$K_a = 0,9$ (retificado)

$K_b = 0,79$ (65 mm)

β_f e β_t permaneceram iguais praticamente.

$\sigma^* = 49.4 \rightarrow 61.7$

CS = 2.8 \rightarrow 2.3

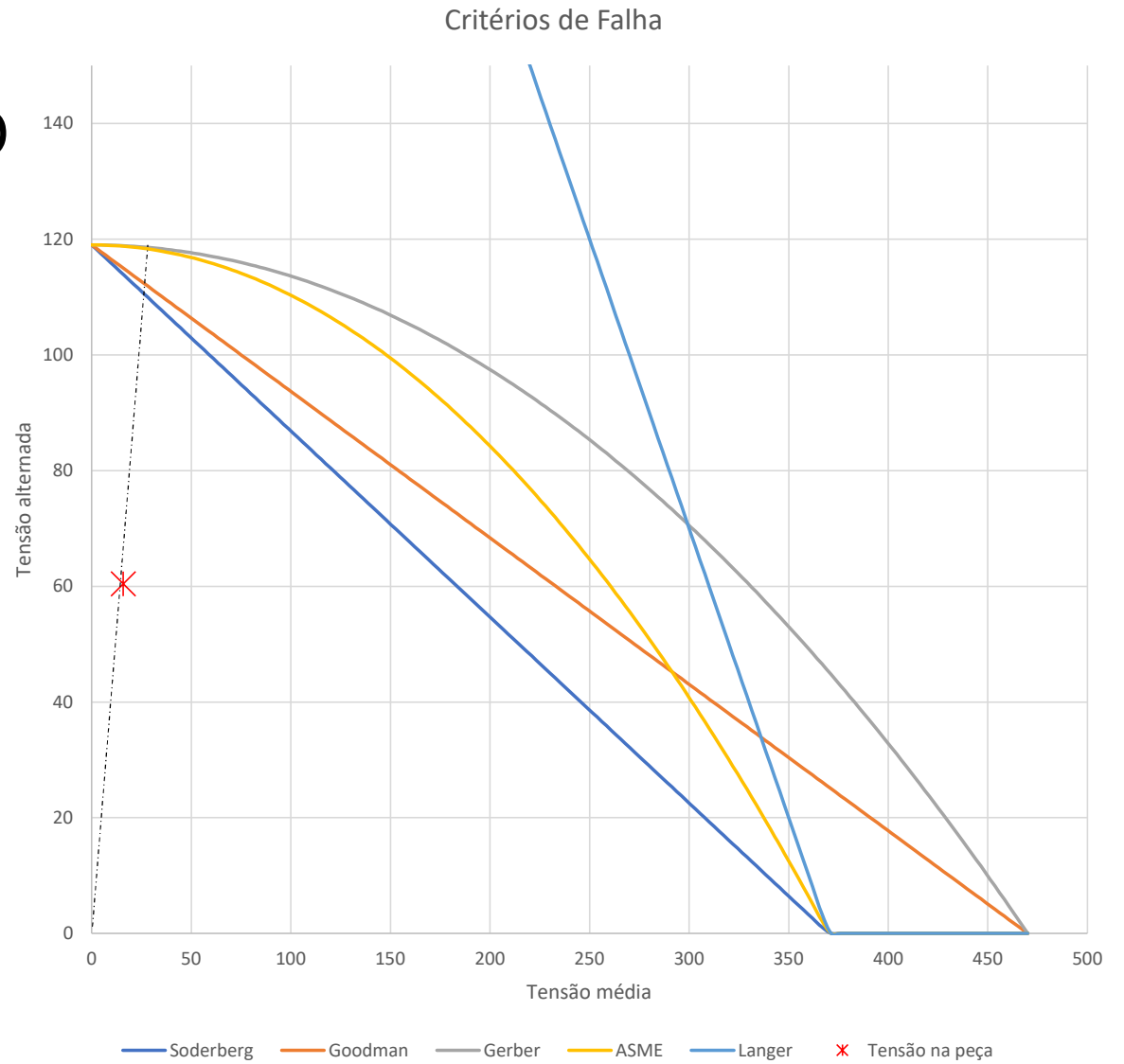
Seria possível melhorar mais caso se deseje diminuir peso.

Automatizar uma planilha com as contas facilita muito

qualquer mudança

k) Estado de tensão

Distância em relação ao critério de falha é o coeficiente de segurança



I) Desenho final

Colocar todas as cotas para fabricação

- Diâmetros
- Raios
- Comprimentos
- Chanfros

Fluxograma

