

ELEMENTOS DE MÁQUINAS (SEM 0241)

Notas de Aulas v.2018

Aula 06 – Eixos

Professores: Carlos Alberto Fortulan
Ernesto Massaroppi Junior
Jonas de Carvalho

6- Eixos

6.1-Introdução

Elemento sobre o qual se assentam partes giratórias de uma máquina e que recebe destas as cargas de trabalho que devem ser descarregadas na estrutura da máquina.

- Função : Transmitir esforços
 - Flexão
 - Torção
 - Axiais
- Movimento : Fixos ou rotativos

Nome	Uso	Tipo		Esforços		
		Fixos	Girantes	Flexão	Torção	Axiais
Eixos	normal		X	X	X	X
Eixos-árvore	precisão		X	X	X	X
Fusos*	normal		X			X
Varões*	grosseira	X	X		X	X

* $L/D \gg 50$

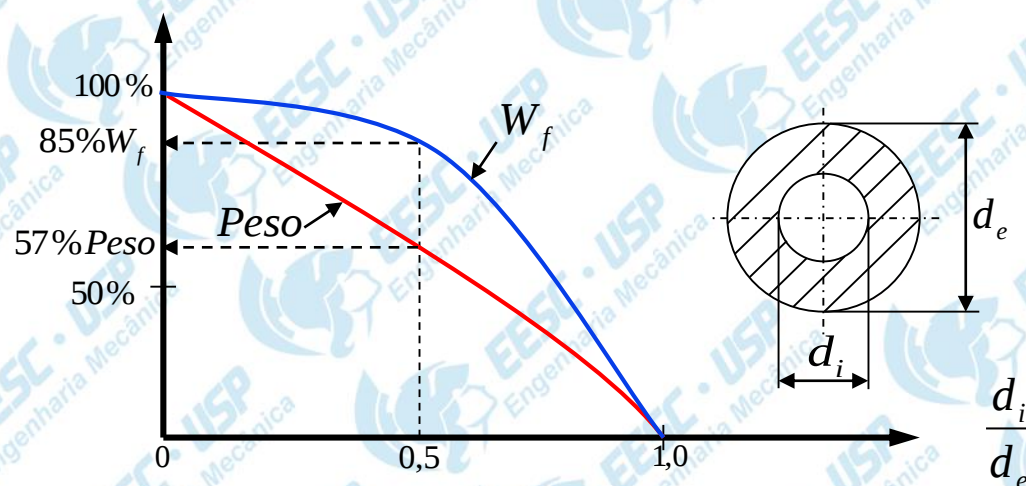
6.2-Construção de eixos

a) Formas construtivas

- cheios
- vazados
- lisos
- escalonados
- Seção circular
- Seção retangular
- Seção hexagonal
- Perfilados
- Articulados
- Telescópicos
- Flexíveis

Eixos devem ser *mais curtos* possíveis $\downarrow L \Rightarrow \downarrow \varnothing \Rightarrow \downarrow \$$ diminuir custos

Redução de peso obtida com eixos vazados.



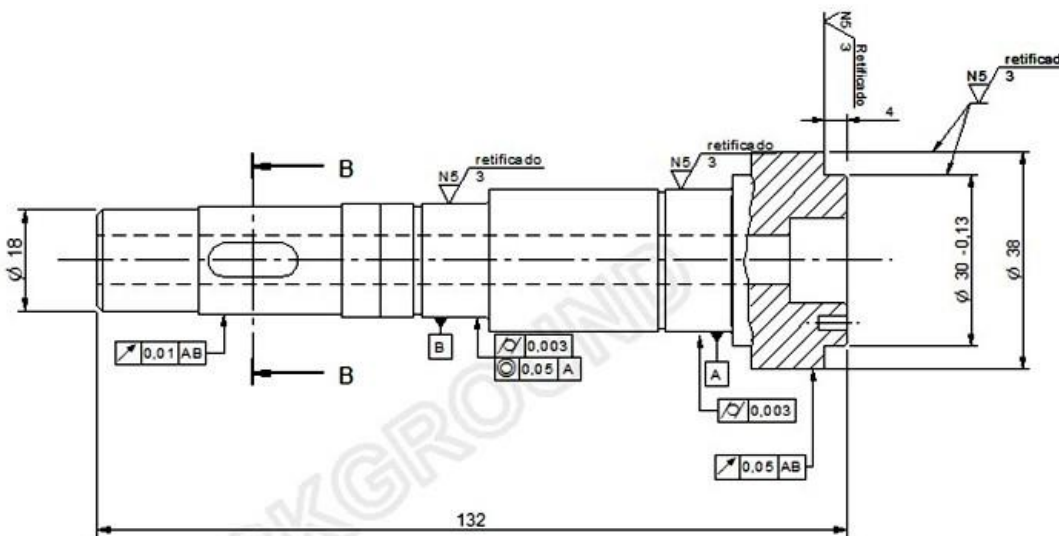


Figura 17.10 – Construção de um eixo flexível

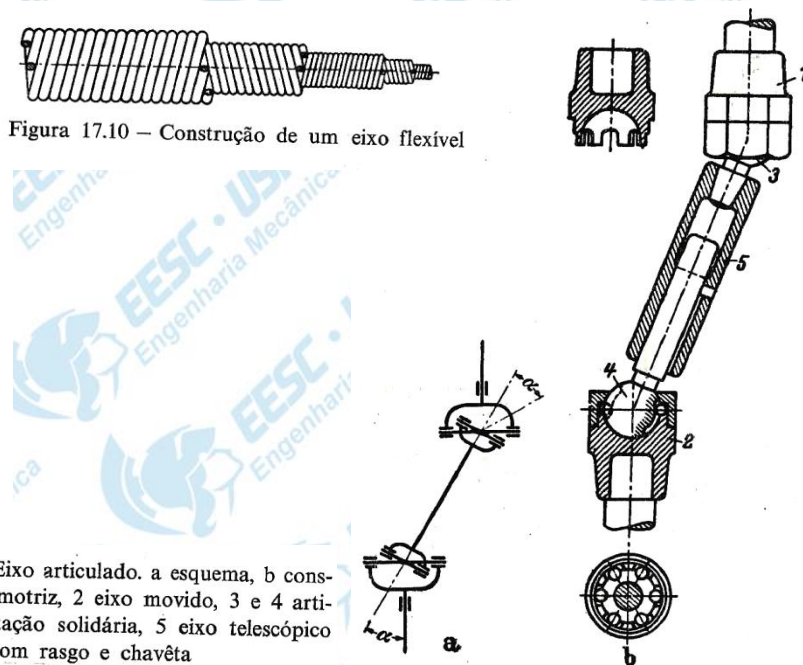


Figura 17.9 – Eixo articulado. a esquema, b construção, 1 eixo motor, 2 eixo movido, 3 e 4 articulações de rotação solidária, 5 eixo telescópico intermediário, com rasgo e chaveta

Escalonamento, a grande maioria dos eixos é escalonada.



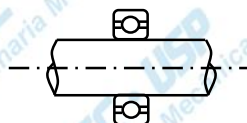
Sem apoio axial
Errado



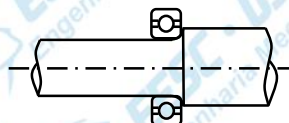
Montagem mais difícil
Errado



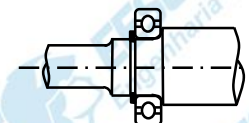
OK !



Errado



Errado



OK !

Tempo de torneamento ↑

Tempo de retificação ↓

NIEMANN, G. Elementos de Máquinas. Ed. Edgard Blücher Ltda. 2 (1971)

Elementos de Máquina (SEM 0241) – MASSAROPPI E, LIRANI J, CARVALHO J, FORTULAN CA (2018)



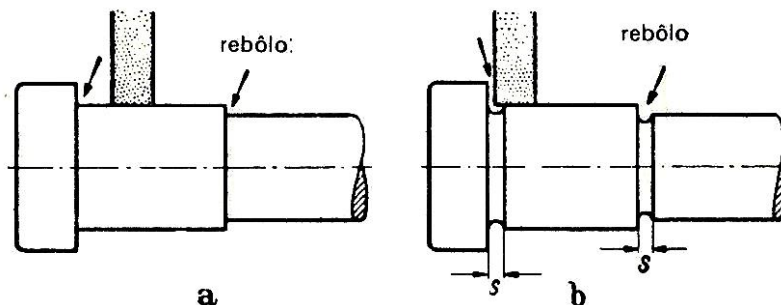
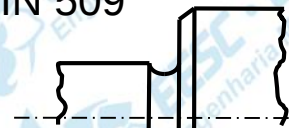
Raios de arredondamento

$$r = 0,05 \sim 0,10 d_{\text{menor}}$$



Encosto de rolamentos
Saída de ferramentas

Canal de alívio DIN 509



DIN 509:2006 - Technical drawings - Relief grooves - Types and dimensions

Superfícies funcionais de eixos

- Assento de mancais
- Assento/encosto engrenagens/polias

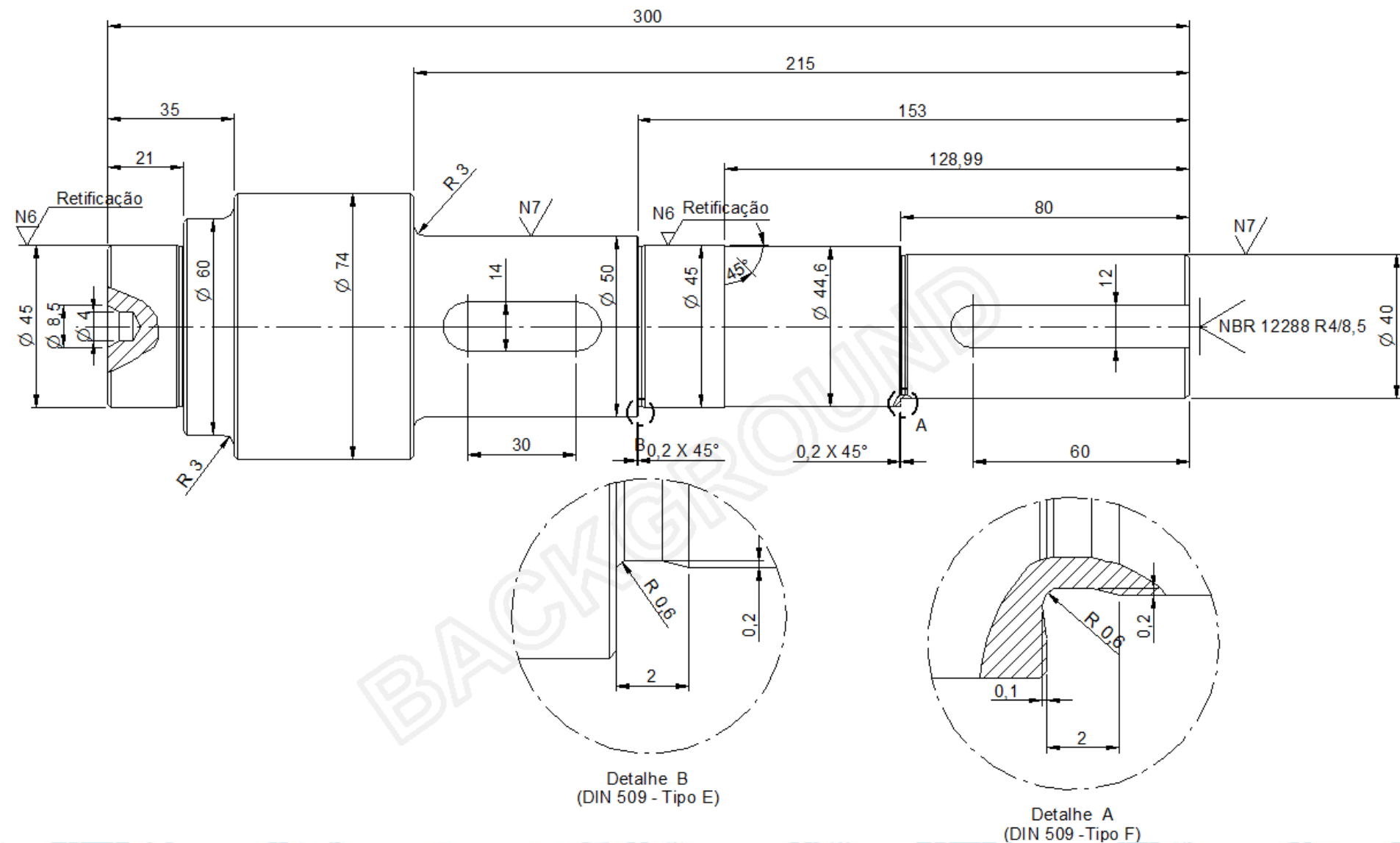
: impõe posição

: transmite forças

Quando necessário :

- especificar rugosidade
- especificar tolerância de forma e posição

concentricidade
coaxialidade
paralelismo
batida



b) Fabricação

- Facear e abrir furo de centro
- Tornear face e longitudinal

▽ e ▽ {
tornos universais
tornos copiadores
tornos CNC

- Tratamento térmico: temperar, revenir

▽▽▽ $R_a = 0.3 \sim 2.5 [\mu m]$

▽▽

▽

- Acabamento

Assento de mancais : retífica

Assento de engrenagens e polias : torneamento

Superfícies acessórias : torneamento

c) Materiais para construção de eixos

Matéria prima :

{	• forjados	}
	• laminados	
	• trefilados	

 barras de até Ø150 mm

- Alta resistência
 - Pequena sensibilidade a concentração de tensões
 - Boa usinabilidade
 - Beneficiável :
- | | |
|---|--|
| { | tempera / revenido |
| | tempera localizada : nitretação, indução ... |

1	2	3	4	5	6	7	8
AISI nº	Tratamento	Temperatura °C (°F)	Resistência à tração MPa (kpsi)	Resistência ao escoamento MPa (kpsi)	Alongamento %	Redução em área, %	Dureza Brinell
1030	Q&T*	205 (400)	848 (123)	648 (94)	17	47	495
	Q&T*	315 (600)	800 (116)	621 (90)	19	53	401
	Q&T*	425 (800)	731 (106)	579 (84)	23	60	302
	Q&T*	540 (1000)	669 (97)	517 (75)	28	65	255
	Q&T*	650 (1200)	586 (85)	441 (64)	32	70	207
	Normalizado	925 (1700)	521 (75)	345 (50)	32	61	149
	Recozido	870 (1600)	430 (62)	317 (46)	35	64	137
1040	Q&T	205 (400)	779 (113)	593 (86)	19	48	262
	Q&T	425 (800)	758 (110)	552 (80)	21	54	241
	Q&T	650 (1200)	634 (92)	434 (63)	29	65	192
	Normalizado	900 (1650)	590 (86)	374 (54)	28	55	170
	Recozido	790 (1450)	519 (75)	353 (51)	30	57	149
1050	Q&T*	205 (400)	1120 (163)	807 (117)	9	27	514
	Q&T*	425 (800)	1090 (158)	793 (115)	13	36	444
	Q&T*	650 (1200)	717 (104)	538 (78)	28	65	235
	Normalizado	900 (1650)	748 (108)	427 (62)	20	39	217
	Recozido	790 (1450)	636 (92)	365 (53)	24	40	187
4140	Q&T	205 (400)	1770 (257)	1640 (238)	8	38	510
	Q&T	315 (600)	1550 (225)	1430 (208)	9	43	445
	Q&T	425 (800)	1250 (181)	1140 (165)	13	49	370
	Q&T	540 (1000)	951 (138)	834 (121)	18	58	285
	G&T	650 (1200)	758 (110)	655 (95)	22	63	230
	Normalizado	870 (1600)	1020 (148)	655 (95)	18	47	302
	Recozido	815 (1500)	655 (95)	417 (61)	26	57	197
4340	Q&T	315 (600)	1720 (250)	1590 (230)	10	40	486
	Q&T	425 (800)	1470 (213)	1360 (198)	10	44	430
	Q&T	540 (1000)	1170 (170)	1080 (156)	13	51	360
	Q&T	650 (1200)	965 (140)	855 (124)	19	60	280

Fonte: ASM Metals Reference Book, 2d ed., American Society of Metal, Metals Park, Ohio, 1983.

* Temperado em banho de água

como orientação: $\alpha = 0.577$ para fadiga

Obs. Usa-se : $\tau_{e,R} = \alpha \cdot \sigma_{e,R}$

$\alpha = 0.8$ solicitação estática

d) Causas de rupturas em eixos

- Fadiga
 - cálculos ou hipóteses incorretas
- Erros de avaliação da sollicitação dinâmica
- Sobrecargas não previstas
- Apreciação incorreta dos pontos ou valor das concentrações de tensões
- Montagem incorreta
 - folga excessiva
 - pré-carga excessiva
 - falta de liberdade para dilatação térmica
 - montagem incorreta dos rolamentos
- Flecha de trabalho excessiva
- Falta de rigidez flexional
- Falta de rigidez torcional

6.3- Cálculo de Eixos

- Quanto à resistência mecânica (ou à σ_{adm})
- Quanto à rigidez (ou à flecha admissível)
- Quanto à velocidade crítica (frequência natural)

Eixos comuns



cálculo à σ_{adm}

$$\sigma \leq \sigma_{adm}$$

- eixos de redutores de velocidade
- eixos de laminadores
- eixos de máquinas de elevação
- eixos de transmissão (carros / caminhões)

Eixos de precisão



cálculo à flecha admissível

$$\sigma_{trab} \ll \sigma_R$$

limitante é deflexão

$$\delta \leq \delta_{adm}$$

- eixos árvore de máquinas ferramentas
- aparelhos de metrologia

Eixos com rotação elevada



um dos critérios anteriores

+

velocidade crítica

$$\omega < \omega_{crit}$$

- eixos árvore de retificadoras internas : 50000 [rpm]
- eixos centrifugadores : 30000 [rpm]
- giroscópios : 20000 [rpm]

Roteiro Geral de Projeto de Eixos

1 – Cálculos de pré-dimensionamento

- simplificações → $\emptyset$

2 – Desenho preliminar

- localização das seções críticas

3 – Cálculos de verificação

- resistência mecânica
- rigidez
- velocidade crítica

4 – Desenho final

OBS.: O roteiro e a maioria dos cálculos de verificação servem para peças em geral além de eixos

6.4- Cálculo de Eixos quanto a resistência mecânica

$$\sigma^* \leq \sigma_{adm} \quad \text{ou} \quad \sigma^* = \frac{\sigma_Y}{N}$$

σ^*	Solicitação Estática	$\sigma^* = \sqrt{\sigma_f^2 + 3\tau^2}$
	Solicitação Dinâmica	$\sigma^* = \sqrt{(\sigma_{\max} \cdot K_{ff})^2 + H^2 (\tau_{\max} \cdot k_{ft})^2}$
σ_{adm}	Solicitação Estática	$\sigma_{adm} = \sigma_Y$ Também usado para pré-dimensionamento
	Solicitação Dinâmica	$Se = C_{\text{superf}} C_{\text{tamanho}} C_{\text{carreg}} C_{\text{temp}} C_{\text{conf}} C_{\text{entalhe}} Se'$

6.4.1- Cálculo da Tensão Admissível

a) Sob solicitação estática

$$\sigma_{adm} = \frac{\text{tensão perigosa}}{\text{coeficiente de segurança}}$$

solicitação estática :

- “não fadiga”
- solicitação variável baixa ciclagem
- pré dimensionamento



Tensão Perigosa (T.P)

Orientação geral :

- material dúctil : σ_e
- material frágil : σ_R

Outras situações possíveis para T.P

- T_e
- $\sigma_{flambagem}$
- $\sigma_{pressão\ esp}$
- limite de resistência : “creep”
- limite de resistência ao desgaste

Determinação da T.P deve levar em conta :

- condições de serviço
- resistência do material sob carga
- condições de segurança

Passos para dimensionamento do eixo:

- a) Croqui do eixo para planejamento, aqui se observa: o comprimento; escalonamentos; apoios de: rolamentos, engrenagem, polias; rasgos de anéis elásticos, saídas de rebolo, rasgos para chavetas, acabamentos superficiais;
- b) Determinação das forças, das reações de apoio e desenho dos Diagramas MNQ;
- c) Determinação do Momento Equivalente (M_{eq});
- d) Planejamento de abordagem, sobre o croqui esboçado em a) priorizar as seções críticas pela ocorrência de maior momento equivalente e pré-existência de fatores modificadores de resistência (entalhes);
- e) Verificar o caso solicitação a que pertence o eixo e fazer o pré dimensionamento da seção considerada mais crítica;
- f) Cálculo da tensão de confronto c^* ;
- g) Determinação do limite à fadiga alternada corrigido;
- h) Verificação da fadiga pelo coeficiente de segurança;
- i) Pré-dimensionar demais seções:
 - a) Analiticamente;
 - b) Planejamento: o escalonamento de diâmetro é necessário para posicionamento; montagem; fabricação e manutenção; por algumas destas razões muitas vezes o diâmetro será maior do que necessitaria devido às tensões atuantes. Então, é comum que nas variações diametrais de apoio se tenha d_1/d_2 de 1,2 a 1,4, para rolamentos e engrenagens respectivamente.

J) Croqui final.

6.5. Referências

- Niemann G. *Elementos de Máquinas*, vol. I, Editora Edgard Blucher, 1991.
- Norton, RL. “Projeto de Máquinas”, 2.ed. Bookman, Porto Alegre, 2004.
- Shigley, JE; Mitchell, LD. *Projeto de Engenharia Mecânica*, 7th ed., Bookman, Porto Alegre 2005