

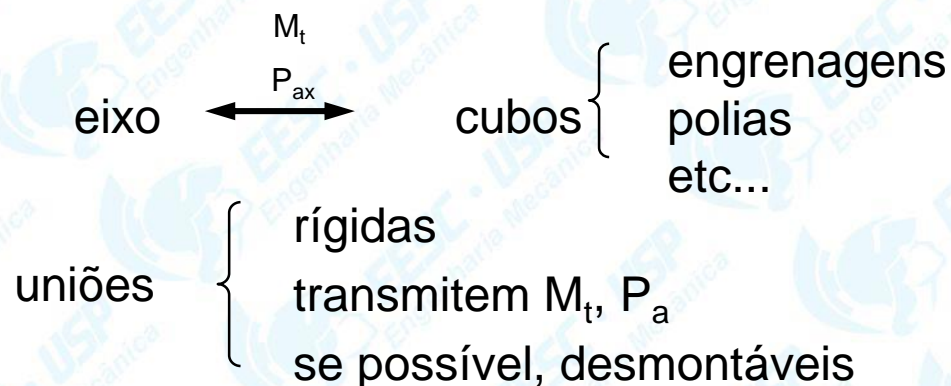
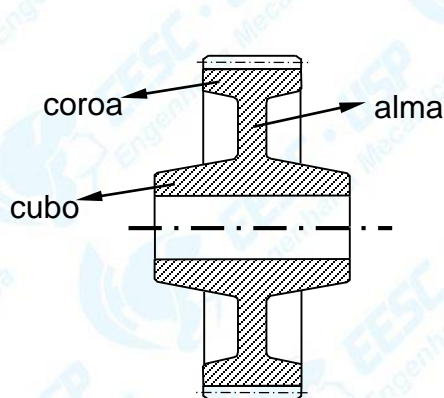
ELEMENTOS DE MÁQUINAS (SEM 0241)

Notas de Aulas v.2020

Aula 08 – Uniões Eixo - Cubo

Professores: Ernesto Massaroppi Junior
Jonas de Carvalho
Carlos Alberto Fortulan

UNIÕES EIXO - CUBO



Tipos de União

I - UNIÕES POR ATRITO

- através de ajuste com interferência transversal
- através de ajuste com interferência longitudinal
- com cubo bipartido
- com assento cônico

II - UNIÕES ENCAIXADAS (adaptação de forma)

- pino transversal
- chaveta
- ranhuras múltiplas
- dentes
- perfil K

III - UNIÕES ENCAIXADAS SOB TENSÃO

- pino tangencial
- chaveta meia-lua inclinada
- chaveta inclinada embutida
- chaveta inclinada de cravação
- chavetas tangenciais

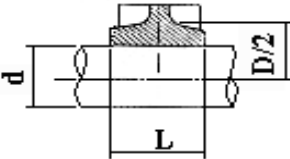
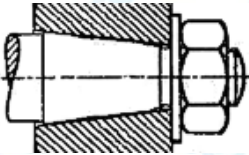
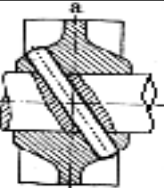
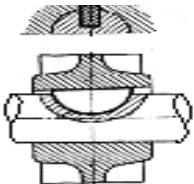
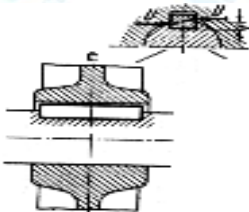


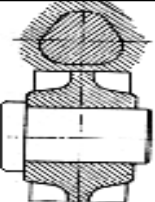
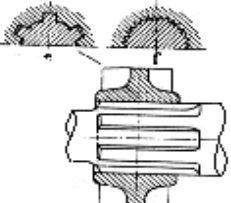
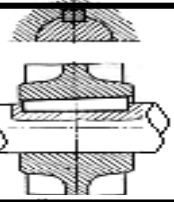
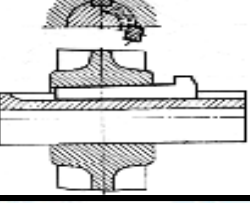
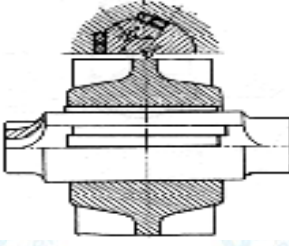
https://www.norelem.com/xs_db/BILD_DB/2/www/750/22400-0110150012-Stirnzahnrad-Spur-gear.jpg



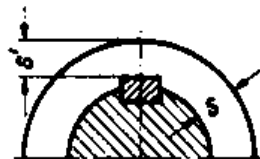
https://loja.casadasoficinas.com/img/imagens_produto/27851.jpg

<https://vitorbuono.com.br/image/cache/catalog/GIN-B01-3-500x500.jpg>

ESQUEMA	UNIÃO EIXO CUBO	T(min)	CUSTO(DM)
	Interferência Longitudinal Interferência Transversal	36,5 40,0	2,50 2,68
	Assento Cônico Assento Cônico c/ chaveta Assento Cônico c/ chaveta, arruela e porca	48,0 57,7 77,7	3,32 4,18 6,02
	Pino Cônico Transversal Pino Ranhurado Transversal	43,8 40,8	3,00 2,79
	Chaveta Meia-Lua	43,2	2,93
	Chaveta Plana Embutida	52,6	3,41

ESQUEMA	UNIÃO EIXO CUBO	T(min)	CUSTO(DM)
	Perfil K Perfil K, arruela e porca	61,7 74,2	4,23 5,72
	Ranhuras Ranhuras, arruela e porca Dentes Dentes, arruela e porca	60,2 80,7 62,2 74,2	4,65 6,14 3,23 4,72
	Chaveta Inclínada Embutida	55,2	3,52
	Chaveta Inclínada c/ cabeça	62,2	3,87
	Chaveta Tangencial Chaveta Tangencial, cubo bi-partido e dois parafusos	66,7 102,7	4,18 6,77

Valores orientativos de dimensões do cubo



$$L \cong x \cdot \sqrt[3]{M_t} \quad \text{largura}$$

$$S \cong y \cdot \sqrt[3]{M_t} \quad [\text{cm}]$$

$$S' \cong y' \cdot \sqrt[3]{M_t} \quad M_t : [\text{Kgf.cm}]$$

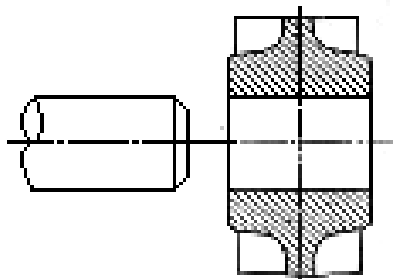
Tabela 18.1 Niemann

União	Cubo de Ferro Fundido			Cubo de aço fundido / aço		
	X	Y	Y'	X	Y	Y'
Ajuste térmico e forçado assento cônico, união por atrito	0.42 – 0.53	0.21 – 0.30	0.21 – 0.30	0.21 – 0.35	0.18 – 0.26	0.18 – 0.27
Chaveta inclinada, plana, ajuste forçado sem interferência, uniões encaixadas	0.53 – 0.70	0.18 – 0.21	0.15 – 0.18	0.35 – 0.46	0.14 – 0.18	0.11 – 0.15
Eixo chavetado DIN 5462	0.34 – 0.42	0.14 – 0.18	0.13 – 0.16	0.21 – 0.30	0.125 – 0.16	0.11 – 0.15
Eixo chavetado DIN 5463	0.21 – 0.30	0.14 – 0.18	0.12 – 0.15	0.13 – 0.21	0.125 – 0.16	0.10 – 0.14
Eixo chavetado DIN 5464	0.14 – 0.21	0.14 – 0.18	0.11 – 0.14	0.08 – 0.13	0.125 – 0.16	0.09 – 0.13

$$L_{\text{cubo}} = \max(L_{\text{min critério 1}}, L_{\text{min crit 2}}, L_{\text{min crit 3}}, \text{etc})$$

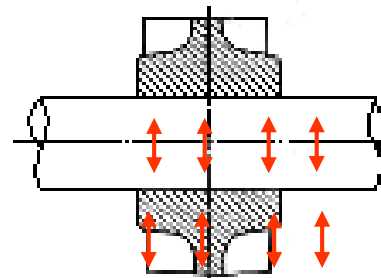
$$\text{também : } 2 \cdot L_{\text{engrenagem}} \geq L_{\text{cubo}} \geq L_{\text{engrenagem}}$$

8 – Uniões por atrito



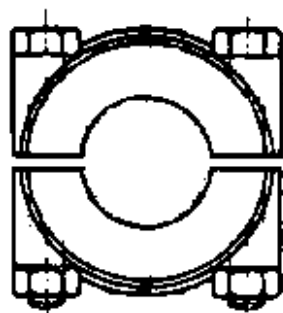
Interferência longitudinal

Montagem com prensa

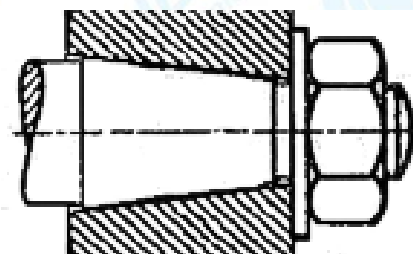


Interferência transversal

Montagem com dilatação térmica

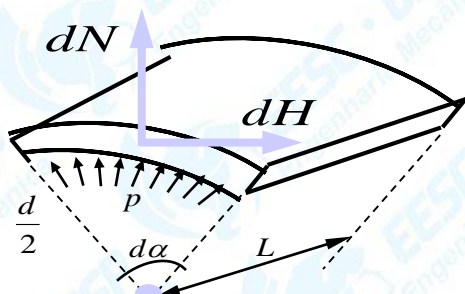


Cubo bipartido



Ajuste cônico

Equacionamento Básico das Uniões por Atrito



- pressão distribuída - p
- diâmetro do eixo - d
- comprimento cubo - L
- coeficiente atrito - μ

$$dH = \mu \cdot dN$$

$$dN = p \cdot dA$$

$$dN = p \cdot L \cdot \text{arco} = p \cdot L \cdot \frac{d}{2} \cdot d\alpha \Rightarrow N = p \cdot L \cdot \frac{d}{2} \cdot \int_0^{2\pi} d\alpha$$

$$N = p \cdot L \cdot \frac{d}{2} \cdot 2\pi \Rightarrow \boxed{N = p \cdot \pi \cdot d \cdot L}$$

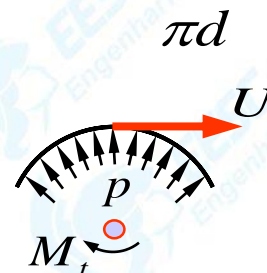
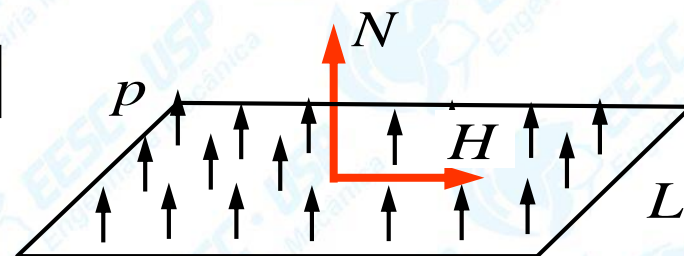
$$H = \mu \cdot N \Rightarrow \boxed{H = p \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot \mu}$$

Força de retenção devida ao atrito - H

$$M_t \leq H \cdot \frac{d}{2}$$

Força tangencial no eixo devida ao M_t - U

$$U = \frac{2 \cdot M_t}{d}$$



$U \leq H$, no limite, $U = H$

Substituindo $M_t = W_t \cdot \tau_{\max} = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \cdot \tau_{\max}$

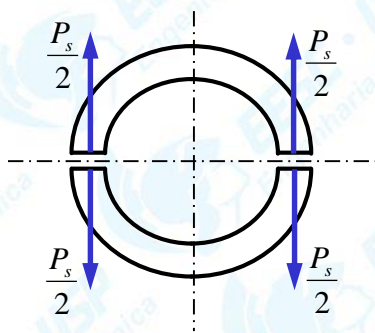
$$\frac{\pi \cdot d^3}{16} \cdot \tau_{\max} \cdot \frac{2}{d} = p \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot \mu \Rightarrow$$

$$\boxed{\frac{L}{d} = \frac{1}{8 \cdot \mu \cdot p} \cdot \tau_{\max} \cdot \varepsilon}$$

Também de $U \leq H$ vem que :

$$U \leq p \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot \mu \Rightarrow \boxed{p \cdot d \cdot L} \geq \frac{U}{\pi \cdot \mu}$$

Área projetada

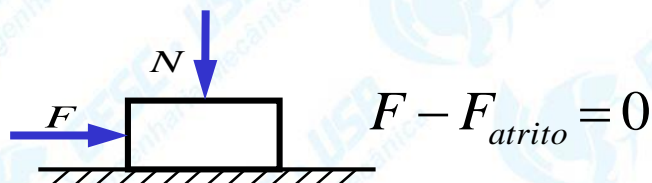
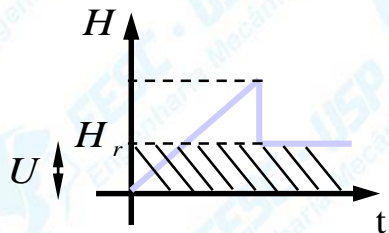
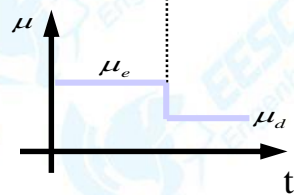
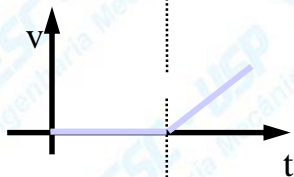
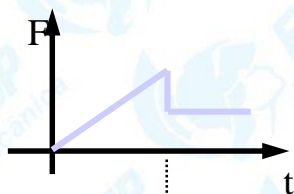


$$\boxed{P_s = p \cdot d \cdot L \geq \frac{U}{\pi \cdot \mu} = \frac{2 \cdot M_t}{\pi \cdot d \cdot \mu}}$$

P_s - força de separação do cubo

A pressão específica na área projetada deve obedecer :

$$p \leq p_{adm} \Rightarrow \boxed{L_{\min} = \frac{P_s}{p_{adm} \cdot d}}$$



$$\mu_{est} > \mu_{din}$$

$$H > H_r$$

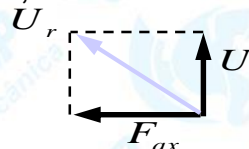
por isso adota-se: $U \leq H_r$

H_r : força de deslizamento

$$U \cong H \Rightarrow$$

qualquer sobrecarga causará deslizamentos

Se houver também força axial, considerar U_r em vez de U

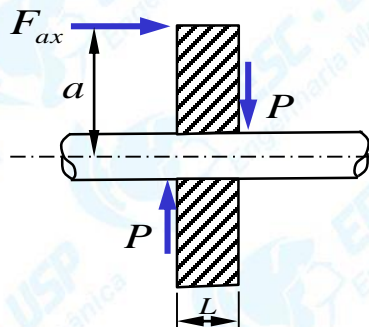


Se houver só força axial:

$$U = F_{ax}$$

Havendo $F_{axial} \Rightarrow F_{ax} \cdot a = P \cdot L$ (momento de tombamento)

ocorrerá **auto-retenção** (mesmo para ajuste auto deslizamento)

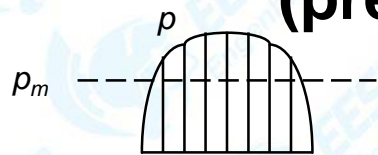
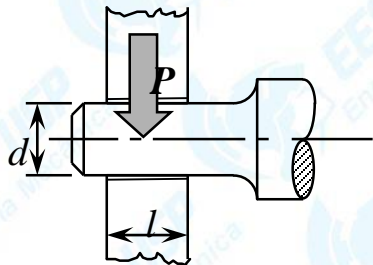


$$\text{Se } H \geq F_{ax} \quad H = 2P\mu$$

$$H = 2F_{ax} \cdot \frac{a}{L} \cdot \mu \geq F_{ax} \Rightarrow \boxed{\frac{a}{L} \geq \frac{1}{2\mu}}$$

(condição para auto-retenção)

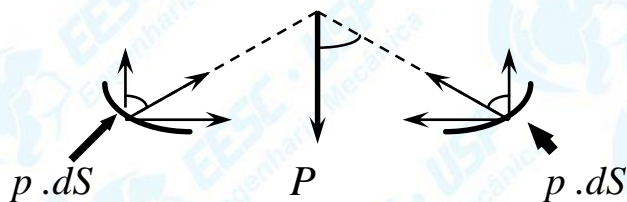
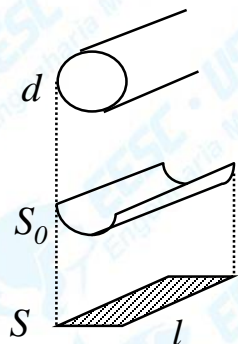
Tensão normal de contato entre 2 superfícies (pressão específica)



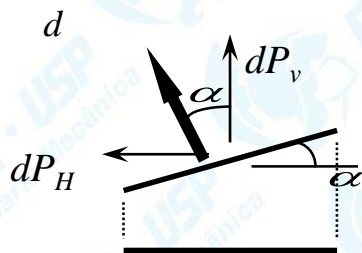
Distribuição de Hertz

$$p_m = \frac{P}{S}$$

$$S = d \cdot l$$



Componentes horizontais se anulam



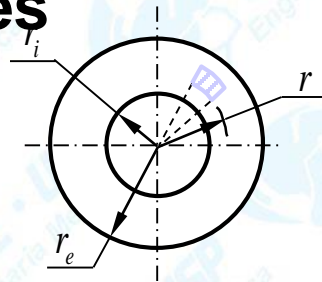
$$dP_v = (p \cdot dS) \cdot \cos \alpha$$

$$dP_v = p \cdot (dS \cdot \cos \alpha)$$

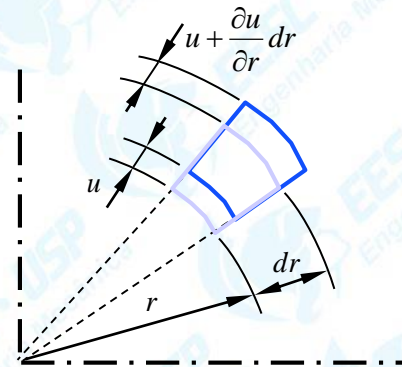
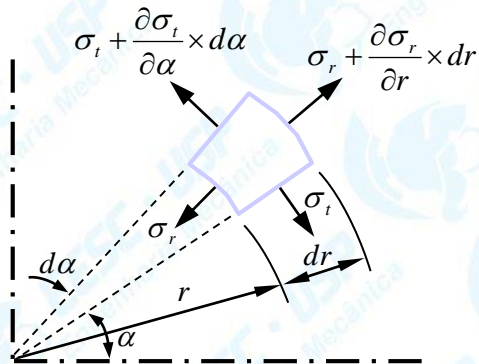
$$P = \int_{S_0} p \cdot \cos \alpha \cdot dS = p_m \cdot \int_S dS = p_m \cdot S$$

$dS \cdot \cos \alpha = \text{área projetada}$

Tensões e deformações



$$r \in [r_i, r_e]$$



$$\text{Axissimetria} \Rightarrow \frac{\partial \sigma_t}{\partial \alpha} = 0$$

$$\sum F_r = 0, \quad \text{Assumindo largura unitária (b = 1)}$$

$$0 = -\sigma_r \times d\alpha + \left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \times dr \right) (r + dr) d\alpha - 2\sigma_t \cdot dr \cdot \text{sen} \left(\frac{d\alpha}{2} \right)$$

$$\text{Mas : } \text{sen} \left(\frac{d\alpha}{2} \right) \cong \frac{d\alpha}{2} \Rightarrow \frac{\partial(\sigma_r \cdot r)}{\partial r} - \sigma_t = 0$$

I

Condição de equilíbrio

$$\varepsilon_t = \frac{(r+u)d\alpha - r \cdot d\alpha}{r \cdot d\alpha} = \frac{u}{r}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\left(u + \frac{\partial u}{\partial r} dr + dr - u \right) - dr}{dr} = \frac{du}{dr} = \frac{d(\varepsilon_t \cdot r)}{dr}$$

II

Condição de compatibilidade

Relação entre tensão e deformação :

$$\sigma_r - \nu \cdot \sigma_t = E \cdot \varepsilon_r$$

$$\sigma_t - \nu \cdot \sigma_r = E \cdot \varepsilon_t$$

III

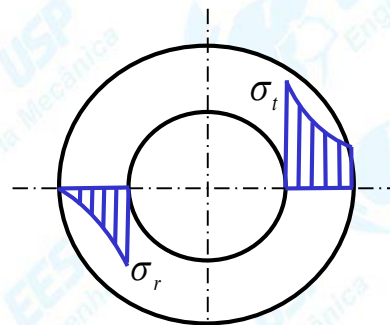
De I, II e III :

$$r \frac{d^2 \sigma_r}{dr^2} + 3 \frac{d\sigma_r}{dr} = 0$$

Cuja solução é do tipo :

$$\sigma_r = \frac{A}{r^2} + B$$

Cubo



Pressão interna

$$\begin{cases} r = r_i & \Rightarrow & \sigma_r = -p \\ r = r_e & \Rightarrow & \sigma_r = 0 \end{cases}$$

$$\sigma_r = p \frac{\left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r}\right)^2 \right]$$

$$\sigma_t = p \frac{\left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2} \left[1 + \left(\frac{r_e}{r}\right)^2 \right]$$

Deslocamento
em $r = r_i$

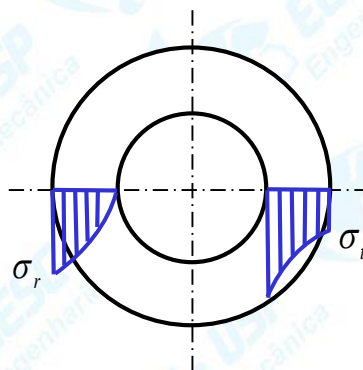
$$\frac{u_i}{r_i} = \frac{p}{E} \left[\frac{1 + \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2} + \nu \right]$$

$E =$ módulo de elasticidade

$\nu =$ coeficiente de poisson

$\mu_i =$ deslocamento radial interno

Eixo



Pressão externa

$$\begin{cases} r = r_i & \Rightarrow & \sigma_r = 0 \\ r = r_e & \Rightarrow & \sigma_r = -p \end{cases}$$

$$\sigma_r = -p \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2}$$

$$\sigma_t = -p \frac{1 + \left(\frac{r_i}{r}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2}$$

Deslocamento
em $r = r_e$

$$r_i = 0 \Rightarrow \sigma_r = \sigma_t = -p$$

$$\frac{u_e}{r_e} = -\frac{p}{E} \left[\frac{1 + \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2} - \nu \right]$$

$E =$ módulo de elasticidade

$\nu =$ coeficiente de poisson

$\mu_e =$ deslocamento radial externo

Interferência :

$$u_r = u_{ic} - u_{eE}$$

$$\frac{u_r}{r} = \frac{p}{E_c} \left[\frac{1 + \left(\frac{r_{ic}}{r_{ec}} \right)^2}{1 - \left(\frac{r_{ic}}{r_{ec}} \right)^2} + \nu_c \right] + \frac{p}{E_E} \left[\frac{1 + \left(\frac{r_{iE}}{r_{eE}} \right)^2}{1 - \left(\frac{r_{ie}}{r_{eE}} \right)^2} - \nu_E \right]$$

Para :

$$\left. \begin{aligned} E_c &= E_E = E \\ \nu_c &= \nu_E = \nu \end{aligned} \right\}$$

mesmo material

$$r_{iE} = 0$$

eixo maciço

$$r_{cE} = r_{ic} = \frac{d}{2}$$

$$r_{ec} = \frac{D}{2}$$

$$\frac{u_r}{r} = \frac{u_d}{d} = \frac{p}{E} \cdot \frac{2}{1 + \left(\frac{d}{D} \right)^2}$$

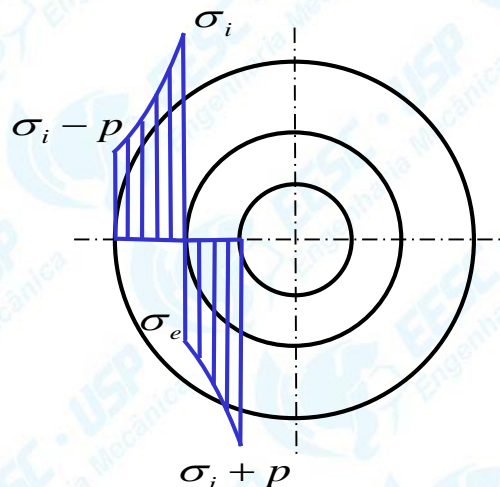
Tensões :

Tensões Tangenciais :

$$\sigma_{tm} = \frac{P_s}{(D - d).L}$$

$$\sigma_{tcubo} = \sigma_1 = p \cdot \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1}, \quad a_1 = \frac{D}{d_1}$$

$$\sigma_{teixo} = \sigma_e = p \cdot \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1}, \quad a = \frac{d}{d_i}$$



d_i : diâmetro interno do eixo

d_1 : diâmetro do furo

As tensões radiais são do tipo :

$$\sigma_R = -p \frac{a^2 - (2.r / d)^2}{a^2 - 1}$$

$$\text{Se : } \begin{cases} 2.r = D \Rightarrow \sigma_R = 0 \\ 2.r = d \Rightarrow \sigma_{R_{\max}} = -p, \end{cases} \quad \text{sempre} \quad \sigma_t > \sigma_R, \quad \forall r$$

≡ Tubo de parede grossa c/ pressão interna p

Se o eixo é cheio ($d_i = 0$), $\sigma = p$

Pressão devido ao ajuste considerando interferência e diâmetro nominal:

$$\rho = \frac{\mu}{\frac{d}{E_{cubo}} \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \nu_{cubo} \right) + \frac{d}{E_{eixo}} \left(\frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} - \nu_{eixo} \right)}$$

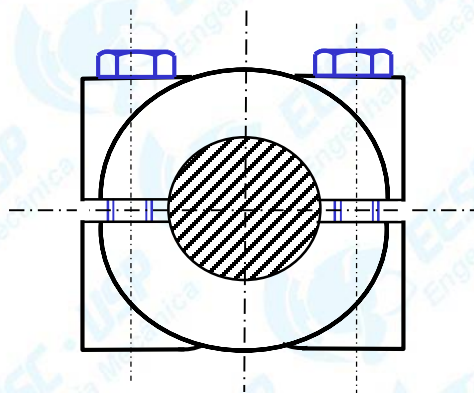
μ = interferência;

D = diâmetro do cubo;

d = diâmetro nominal do eixo;

d_i = diâmetro do furo do eixo.

8.1 - União por Atrito com Cubo bi-partido



$$H = \pi \cdot d \cdot L \cdot p \cdot \mu \geq \frac{2 \cdot M_t}{d}$$

$$P_s = p \cdot d \cdot L = \frac{2 \cdot M_t}{\pi \cdot d \cdot \mu}$$

 P_s

 número de
parafusos

x

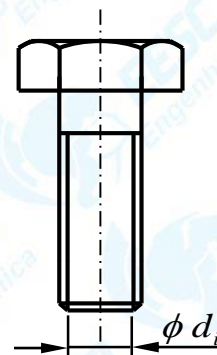
 carga admissível
por parafuso

$$P_s = n \cdot P_p$$

$$P_p = S_p \cdot \sigma_{adm}$$

$$S_p = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$$

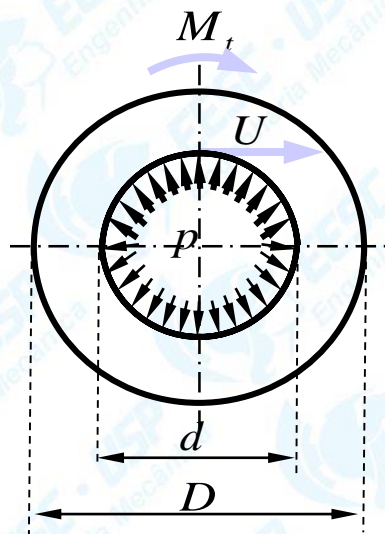
$$\sigma_{adm} = 10 \text{ [kgf/mm}^2\text{]}$$



$$n = \frac{2 \cdot M_t}{\pi \cdot d \cdot \mu \cdot S_p \cdot \sigma_{adm}}$$

$$L_{\min} = \frac{P_s}{p_{adm} \cdot d}$$

8.2 - Uniões através de ajuste com Interferência Transversal



- d_e - diâmetro eixo
- d_1 - diâmetro do furo ($d_1 < d_e$)
- $u = d_e - d_1 \rightarrow$ interferência

Força Tangencial :
$$U = \frac{2.M_t}{d}$$

Forças de deslizamento e retenção :

Força de deslizamento igual à força a ser transmitida ao eixo

$$H_R = U \quad H_R = 0,47.H \quad \Rightarrow \quad H = \frac{U}{0,47}$$

Interferência mínima necessária p/ transmitir M_t :

$$H = u_m \cdot q_1 \cdot L \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^e \right] \geq U = \frac{2.M_t}{d}$$

$u_m \Rightarrow$ interferência mínima necessária
 $q_1, e \Rightarrow$ tab. 18.4 pag. 66 Niemann v.2

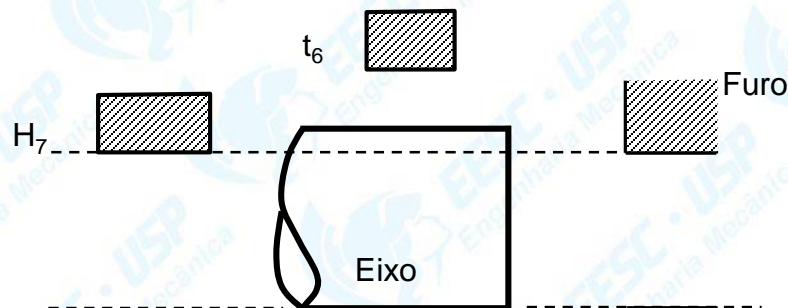
$$u_m = \frac{H}{q_1 \cdot L \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^e \right]}$$

Valor da máxima interferência elástica :

$u_m < u_e$, senão há deformações plásticas no ajuste

u_e : tab. 18.4

Escolha do ajuste que satisfaz :



• Eixo : $t_6 - d_{eM}, d_{eM}$

• Furo : $H_7 - d_{1M}, d_{1m}$

• máxima interferência : $u_{\max \text{ aj.}} = d_{eM} - d_{1m}$

• mínima interferência : $u_{\min \text{ aj.}} = d_{em} - d_{1M}$

$$u_{\max \text{ aj}} < u_e$$

$$u_{\min \text{ aj}} > u_m$$

Devemos ter :

Ex :

$$\text{Eixo } 40 \text{ H}_7 \text{ t}_6$$

$$u_e = 140 \mu\text{m}$$

$$u_m = 20 \mu\text{m}$$

$$\longrightarrow \begin{cases} \text{eixo} & 40^{+64}_{+48} \\ \text{furo} & 40^{+25}_{+0} \end{cases}$$

$$u_{\max \text{ aj.}} = 64 - 0 = 64 \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$64 < 140 \text{ OK!}$$

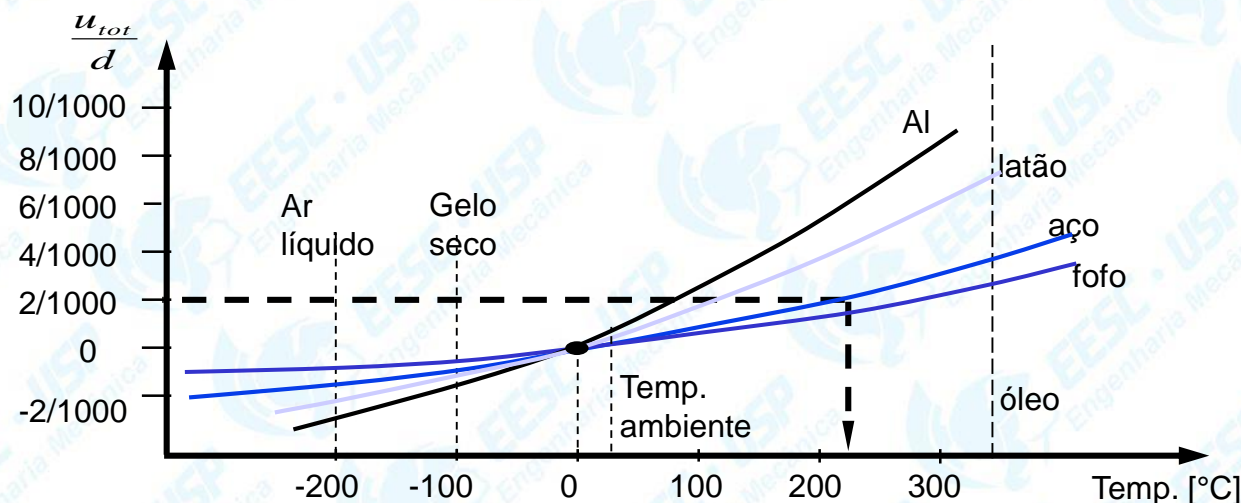
$$u_{\min \text{ aj.}} = 48 - 25 = 23 \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$23 > 20 \text{ OK!}$$

Determinação da temperatura de montagem :

$$u_{tot} = u_{\max aj} + u_f \quad u_f = \frac{d}{1000} \quad (\text{folga para montagem})$$

$$\frac{u_{tot}}{d} = \text{dilatação térmica relativa}$$



$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Exemplo : $\frac{u_{tot}}{d} = \frac{2}{1000}$; Material Aço \rightarrow $t_{montagem} = 220^\circ\text{C}$

OBS.: u_{total} pode ser maior que u_e só na montagem, a união neste caso vai trabalhar com $u_{\max ajuste}$

Alguns dados importantes :

a) Pressão específica admissível - p_{adm}

$$p_{adm} \begin{cases} 30 \text{ a } 50 \text{ [MPa]} & \text{para fofo} \\ 50 \text{ a } 90 \text{ [MPa]} & \text{para aço} \end{cases}$$

Ver também tabela 11.4 (Niemann)

b) Coeficiente de atrito μ

estático $\longrightarrow \mu_{est} = 0,15 \sim 0,30$

depende : $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ lubrificação} \\ \bullet \text{ pressão específica} \\ \bullet \text{ acabamento superficial} \end{array} \right.$

com pó Carborundum : $\mu_{est} = 0,65$

dinâmico $\longrightarrow \mu_{din} = 0,5 \cdot \mu_{est}$

c) Máxima interferência para se ter regime elástico :

Eixo	Cubo	Interferência [μm]
Aço	Aço	3.5d
Aço	FoFo	2.2d
Aço	Celeron	2.0d

Temperaturas de referência

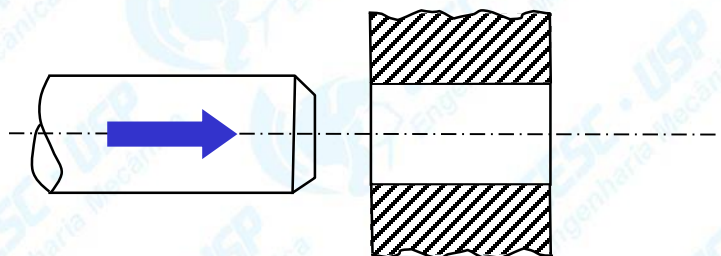
u_t máximo possível de ser conseguida



Aquecimento do Cubo	Chapa quente	Até 100°C	$\frac{3.5d}{1000}$
	Óleo quente	Até 370°C	
	Forno	Até 700°C	
Resfriamento do eixo	Gelo seco (CO ₂ líq.)	Até -80°C	$\frac{0.67d}{1000}$
	O ₂ líq. , N ₂ líq	Até -196°C	

Se $u_t > u_{t \text{ max}}$ possível , aquecer cubo e resfriar eixo

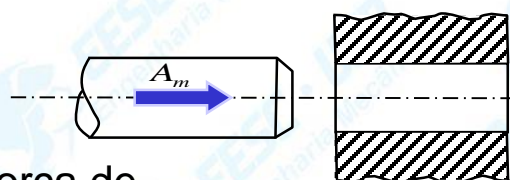
8.3 - União através de Ajuste com Interferência Longitudinal



$$H_R = 0.66H$$

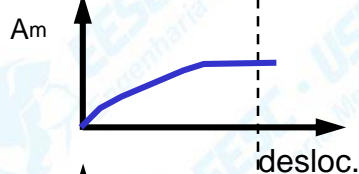
$$\boxed{\text{Interferência longitudinal}} = \boxed{\text{Interferência Radial}} + \boxed{\text{Montagem longitudinal}}$$

- furo acabado com alargador H7
- eixo retificado IT6
- chanfro (10° a 15°)
- lubrificação

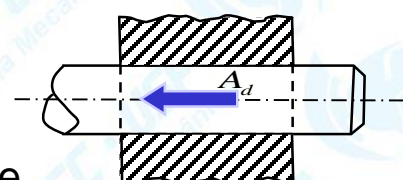
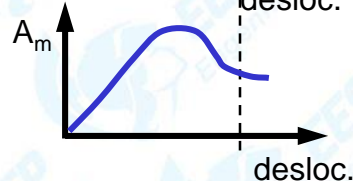


Força de montagem

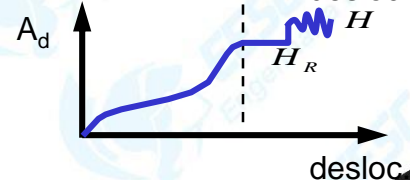
Deformação elástica



Deformação plástica



Força de desmontagem



$$\text{Força desmont.} = H, H_R !$$

Interferência mínima necessária :

a) No regime elástico :

$$u \leq u_e = \frac{3,5.d}{1000}$$

$$H \geq u_m \cdot q_2 \cdot L \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^e\right)$$

$q_2, e \rightarrow$ tab 18.4 – Niemann, v.2, p.66

$$u_m = \frac{H}{q_2 \cdot L \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^e\right)}$$

$$H = \frac{U}{0.66} \text{ int. longitudinal al } \rightarrow \text{ amassa rugosidade}$$

$$H = \frac{U}{0.47} \text{ interferên cia transvers al}$$

b) No regime plástico :

$$u > u_e = \frac{3,5.d}{1000}$$

$$H_{possivel} = L \cdot (B \cdot d + C) \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)\right) ; B, C \rightarrow \text{ tab 18.4 - Niemann, v.2, p.66}$$

garantindo-se u pouco acima de u_e , H não depende de u .

$$u_m = 1,1 \cdot u_e$$


Se $H_{necessário} > H_{possivel}$ então união eixo-cubo não pode ser feita com ajuste longitudinal

Interferência total :

$$u_t = u_m + u_v$$

 $u_v \rightarrow$

compensar perda de interferência por alisamento na montagem

u_v [μm]	0.7	1	2	3	4	5	6	7
Acab. furo	▽▽▽▽		▽▽▽		▽▽		▽	~
	N1 a N3		N4 a N6		N7 a N9		N10-N12	

Escolha do ajuste :

Ajuste	H ₇ s ₆	H ₇ t ₆	H ₇ u ₆	H ₇ x ₆	H ₇ z ₆	H ₇ z _{a6}	H ₇ z _{b6}	H ₇ z _{c6}
$u_t \frac{1000}{d}$	0.40	0.63	1.00	1.60	2.50	3.15	4.00	5.00

$$u_{\min \text{ aj}} > u_t$$

$$u_{\max \text{ aj}} < u_e$$

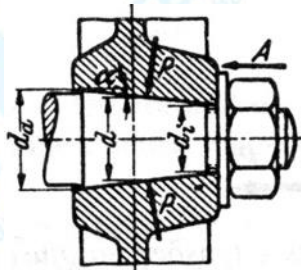
p/ regime elástico

$$u_{\min \text{ aj}} > u_e$$

p/ regime plástico

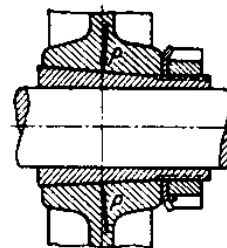
8.4 - União por Atrito com Assento Cônico

Vantagem



eixo cônico

facilidade de desmontagem



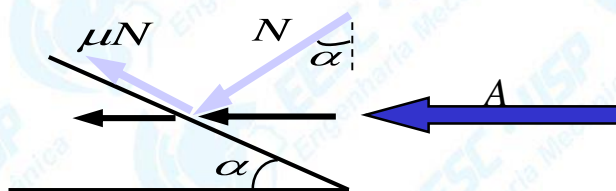
cone posição

Escolha de α :

Uso do cubo

α : tab 18.5 - NIEMANN v.2, p.68

Força Axial necessária (A) :



$$A = N \sin \alpha + \mu \cos \alpha$$

$$A = N (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) ; \alpha \text{ pequeno}$$

$$A = N (\tan \alpha + \mu) ; H = \mu N$$

$$A = H \cdot \frac{(\tan \alpha + \mu)}{\mu}$$

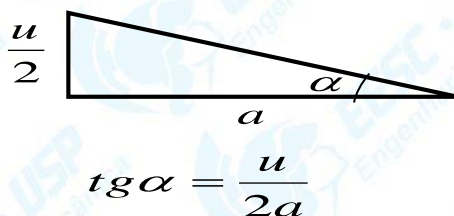
$$H = \frac{2 \cdot M_t}{0,47 \cdot d_{\text{medio}}}$$

$$H_R = U = 0,47 \cdot H$$

- Interferência mínima necessária :

$$H = u_m \cdot q_1 \cdot L \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^e \right)$$

- Deslocamento axial necessário :

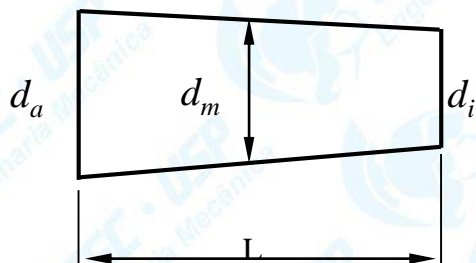


$$a = \frac{u_m}{2 \cdot tg\alpha}$$

- Pressão específica :

$$p = \frac{H}{\mu \cdot \pi \cdot d_{med} \cdot L} \leq P_{adm}$$

- Dimensões do cone :



$$d_a = d_m + L \cdot tg\alpha$$

$$d_i = d_m - L \cdot tg\alpha$$

$$tg\alpha = \frac{d_a - d_i}{2 \cdot L}$$

Passos para dimensionamento de união eixo-cubo por atrito

- Pré-dimensionamento do cubo (tab 18,1 v2 Nieman);
- Cálculo da força tangencial (U);
- Cálculo da força de Separação (Ps);
- Verificação do $L_{\min} \rightarrow L_{\text{pré dimensionado}} > L_{\min}$;
- Cálculo das forças de deslizamento e de retenção; (i, ii, iv)

i) Interferência transversal

$$H_R = 0,47.H$$

ii) Interferência longitudinal

$$H_R = 0,66.H$$

iii) Cubo bipartido

iv) Assento cônico

$$H_R = 0,47.H$$

- Cálculo da interferência mínima necessária u_m no regime elástico (i,ii,iv), no regime plástico (ii);
- Cálculo da máxima interferência elástica $u_m < u_e$; (i,ii,iv)
- Escolha do ajuste ideal; (i, ii)
- Determinação da Temperatura de montagem. (i)

TABELA 11.4 – Valores admissíveis de p , τ_f e τ (kgf/cm²) para junções por pinos, segundo a Tab. 11.3, com solicitação “pulsante”. Para solicitações “alternantes”, multiplicar por 0,7, para estáticas, por 1,5. Para movimento de escorregamento, adotar p segundo o Cap. 15.6. Para pinos ranhurados, multiplicar os valores de p também por 0,7 (pressão elevada de ranhura).

Material	St 37	St 50	St 60	St 70	GS	GG
p	650	880	1050	1200	550	450
σ_f	550	700	850	1000	—	—
τ	360	480	580	680	—	—
ABNT	1020	1030	1040	1050	nodular	cinzento

NIEMANN, G. (1971) Elementos de Máquinas.
Ed. Edgard Blücher Ltda. V.1, p.185

TABELA 18.4 – Coeficientes para ajustes forçados, segundo experiências [18/9], [18/10]

Material		u_e	q_1 (kgf/cm ²)	e	q_2 (kgf/cm ²)	B	C
Eixo	Cubo	(cm)	da Eq. (8)		da Eq. (9)	da Eq. (10)	
St 50	St 50	$d \cdot 3,5/1\ 000$	$5 \cdot 10^5$	2	$2,1 \cdot 10^5$	112	450
St 50	GG	$d \cdot 2,2/1\ 000$	$3,7 \cdot 10^5$	1	$1,12 \cdot 10^5$	510	0
St 50	elétron	$d \cdot 2/1\ 000$	$1,4 \cdot 10^5$	1	$0,72 \cdot 10^5$	225	0

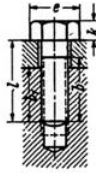



NIEMANN, G. (1995) Elementos de Máquinas.
Ed. Edgard Blücher Ltda. V.2, p.66

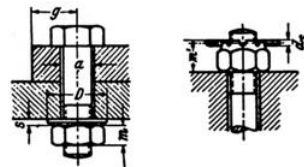
TABELA 18.5 – Inclinações comuns para cones.

Cone ($d_a - d_i$)/L	Inclinação tg α	α	Empregado para
1: 5	1:10	5° 42' 38"	cubos facilmente desmontáveis sobre eixos
1:10	1:20	2° 51' 45"	cubos desmontáveis sobre eixos e buchas reajustáveis para mancais
1:12	1:24	2° 23' 10"	buchas cônicas para mancais de êmbolo
1:15	1:30	1° 54' 30"	hélices, hastes do êmbolo
1:20	1:40	1° 25' 56"	cone métrico; DIN 233 para ferramentas

NIEMANN, G. (1995) Elementos de Máquinas.
Ed. Edgard Blücher Ltda. V.2, p.68

Valores práticos: tg α , segundo Tab. 18.5; coeficiente de atrito $\mu = \text{tg } \rho = 0,15$ a $0,25$.

TABELA 10.13 – Dimensões dos parafusos			Parafusos Métricos																Segundo DIN	
			M 2	M 4	M 6	M 8	M 10	M 12	M 14	M 16	M 18	M 20	M 22	M 24	M 27	M 30	M 33	M 36		
Diâmetro nominal	d	mm																		
Passo	h	mm	0,4	0,7	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,5	2,5	2,5	3	3	3,5	3,5	4	13	
Diâmetro do núcleo	d_1	mm	1,48	3,09	4,70	6,38	8,05	9,73	11,40	13,40	14,75	16,75	18,75	20,10	23,10	25,45	28,45	30,80	(2. 49x)	
Seção transversal do núcleo	F_1	mm ²	1,7	7,5	17,3	31,9	50,9	74,3	102	141	171	220	276	317	419	509	636	745		
 Parafuso sextavado	Altura da cabeça	k	mm	1,4	2,8	4,5	5,5	7	8	9	10,5	12	13	14	15	17	19	21	23	931
	Diâmetro circunscrito	$e \approx$	mm	4,6	8,1	11,5	16,2	19,6	21,9	25,4	27,7	31,2	34,6	36,9	41,6	47,3	53,1	57,7	63,5	(12. 52)
	Abertura da chave de boca	s	mm	4,0	7	10	14	17	19	22	24	27	30	32	36	41	46	50	55	475
	Comprimento de rosca	b	mm	6	10	15	18	20	22	25	28	30	32	35	38	40	45	50	55	931
	Altura da porca	m	mm	1,6	3,2	5	6,5	8	9,5	11	13	15	16	17	18	20	22	25	28	931
	Altura da porca castelo	m'	mm	5	7,5	9,5	11	14	16	19	21	22	25	26	28	31	34	37	395	
	Diâmetro da coupilha	d_s	mm	1	1,5	2	2	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	94
 Parafuso de cabeça cilíndrica	Altura da cabeça	k	mm	1,5	2,8	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16	18	20	84
	Diâmetro da cabeça	D	mm	4	7	10	13	16	18	22	24	27	30	33	36	39	45	48	52	(12. 52)
	Comprimento de rosca	b	mm	6	12	18	20	22	22	25	28	30	32	35	38	40	45	50	55	
 Parafuso com sextavado interno	Altura da cabeça	k	mm	4	6	8	10	12		16		20		24		30		36	912	
	Diâmetro da cabeça	D	mm	7	10	13	16	18		24		30		36		45		54	(4. 40)	
	Comprimento de rosca	b	mm	13	18	22	25	32		38		45		55		65		75		
 Parafuso de embutir	Altura da cabeça	γ	mm	1,2	2,3	3,3	4,4	5,5	6,5	7	7,5	8	8,5	13,1	14	16,6	16,6	18,3	20	87
	Diâmetro da cabeça	D	mm	4	8	12	16	20	24	27	30	33	36	36	39	45	48	53	58	(10. 42)
	Comprimento de rosca	b	mm	7	13	18	22	25	32	32	38	45	45	50	50	55	60	65	75	
Distância da borda	g	mm		6	8	10	13	16	18	20	23	23	25	26	29	32	35	38		
Diâmetro do furo para o parafuso	Usinado com broca	a	mm	2,4	4,8	7	9,5	11,5	14	16	18	20	23	25	27	30	33	36	39	69
	Fundido	a	mm				10,5	13	15	18	20	22	25	27	30	33	36	40	42	(5. 43)
Arruela de apoio	D	mm	5,5	9	12	17	21	24	28	30	34	36	40	44	50	56	60	68	125	
Espessura da arruela de apoio	S	mm	0,5	0,8	1,5	2	2,5	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	6	(5. 43)	
Fôrça do parafuso P* Material St 38.13		kgf					53	126	238	405	564	817	1163	1408	2400	2710	3580	4440		
Fôrça do parafuso P* Material C 35		kgf					75	180	337	582	796	1172	1606	1992	2860	3720	4980	6150		



Escalonamento dos comprimentos dos parafusos.
 l em mm. Até M 6: 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 21, 22 e acima, com intervalo de 5 mm até $l = 15c$ acima de M 6: 15, 20, 22, 25, 28, 30 e acima.
 Comprimento aparafusado: para aço $b_1 \approx 1 \cdot c$ para $b_1 \approx 2d$ até 2,5 d .

(Valores médios)
 24, 26, 28, 30, 35, 40, 45, 50

Varição para cada 10 mm
 $GGb_1 \approx 1,3d$; para metal macio

Frezamento
 Qualidade c
 onde ao St
 St 50); para
 especiais e p

Diâmetro	Furo	Eixos																										
		H7	m6			n6		p6		r6		s6		t6		u6		v6		x6		y6		z6		za 6		
>	≤	Afast. inf. sup.	Afast. inf. sup.	x	Afast. inf. sup.	x	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.	Afast. inf. sup.	Interf. max. min.
	3	+10 0	+8 +2	10 (8)	+10 +4	16 (6)	+12 +6	12 4	+16 +10	16 0	+20 +14	20 4	-	-	+24 +18	24 8	-	-	+26 +20	26 10	-	-	+32 +26	32 16	+38 +32	38 12		
3	6	+12 0	+12 +4	12 (8)	+16 +8	16 (4)	+20 +12	20 0	+23 +15	23 3	+27 +19	27 7	-	-	+31 +23	31 11	-	-	+36 +28	36 16	-	-	+43 +35	43 23	+50 +42	50 23	+56 +42	56 23
6	10	+15 0	+15 +6	15 (9)	+19 +10	19 (5)	+24 +15	24 0	+28 +19	28 4	+32 +23	32 8	-	-	+37 +28	37 13	-	-	+43 +34	43 19	-	-	+51 +42	51 27	+61 +52	61 27	+67 +52	67 27
10	14		+18	18	+23	23	+28	29	+34	34	+39	39	-	-	+44	44	-	-	+51	51	-	-	+61	61	+75	75	+81	81
14	18	0	+21	18 (11)	+12	23 (6)	+18	0	+23	5	+28	10			+33	15			+50 +39	50 21			+71 +60	71 42	+88 +77	88 59	+94	94
18	24		+21	21	+28	28	+35	35	+41	41	+48	48	-	-	+54	54			+60	60			+76	76	+91	91	+97	97
24	30	0	+8	21 (13)	+15	28 (6)	+22	1	+18	7	+35	14			+41	20			+47	26			+63	42	+73	52	+88	77
30	40		+21	21	+28	28	+35	35	+41	41	+48	48			+54	54			+60	60			+76	76	+91	91	+97	97
40	50	+25 0	+25 +9	25 (16)	+33 +17	33 (8)	+42 +26	42 1	+50 +34	50 9	+59 +43	59 18			+64 +48	64 35			+84 +68	84 43			+110 +94	110 69	+128 +112	128 87	+164 +148	164 123
50	65		+30	30	+39	39	+51	51	+57	57	+64	64			+76	76			+96	96			+110	110	+128	128	+164	164
65	80	0	+11	30 (19)	+20	39 (10)	+32	2	+43	18	+59	18			+64	35			+84	43			+110	69	+128	87	+164	123
80	100		+30	30	+39	39	+51	51	+57	57	+64	64			+76	76			+96	96			+110	110	+128	128	+164	164
100	120	+35 0	+35 +13	35 (22)	+45 +23	45 (12)	+59 +37	59 2	+67	67	+74	74			+84	84			+102	72			+122	92	+144	114	+172	142
120	140		+40	40	+52	52	+68	68	+74	74	+81	81			+89	89			+107	87			+126	106	+156	136	+196	176
140	160	0	+15	40 (25)	+27	52 (3)	+43	3	+54	19	+61	44			+70	45			+87	56			+104	84	+134	114	+174	154
160	180		+40	40	+52	52	+68	68	+74	74	+81	81			+89	89			+107	87			+126	106	+156	136	+196	176
180	200		+45	45	+57	57	+73	73	+79	79	+86	86			+93	93			+111	91			+140	120	+180	160	+240	220
200	225	0	+17	63 (28)	+31	60 (14)	+50	5	+67	67	+74	74			+81	81			+99	79			+129	109	+169	149	+229	209
225	250		+40	40	+52	52	+68	68	+74	74	+81	81			+89	89			+107	87			+126	106	+156	136	+196	176
250	280		+52	52	+66	66	+88	88	+94	94	+101	101			+109	109			+127	107			+155	135	+205	185	+285	265
280	315	0	+20	52 (32)	+34	66 (18)	+56	4	+68	68	+75	75			+83	83			+101	81			+131	111	+181	161	+261	241
315	355		+57	57	+73	73	+98	98	+104	104	+111	111			+119	119			+137	117			+175	155	+235	215	+335	315
355	400	0	+21	57 (36)	+37	73 (20)	+62	5	+74	74	+81	81			+89	89			+107	87			+126	106	+156	136	+196	176
400	450		+63	63	+80	80	+108	108	+114	114	+121	121			+129	129			+147	127			+185	165	+255	235	+375	355
450	500	0	+23	63 (40)	+40	80 (23)	+68	5	+80	80	+87	87			+95	95			+113	93			+151	131	+211	191	+311	291
									+132	69	+149	129			+167	147			+185	165			+243	223	+343	323	+503	483

Referências

- Niemann G. *Elementos de Máquinas*, vol. 2, Editora Edgard Blucher, 1991.
- Norton, RL. “Projeto de Máquinas”, 2.ed. Bookman, Porto Alegre, 2004.