

## Lista 8

### União eixo-cubo por atrito

#### 8.1 Exercícios propostos

- 1) Um eixo de aço com 40 [mm] de diâmetro precisa ser unido a uma polia de aço por meio de uma união eixo-cubo com interferência transversal. O momento de torção a ser transmitido é de 1000 [kgf.cm]. Faça o dimensionamento completo da união, incluindo o croqui.
- 2) Idem ao caso anterior tendo-se, além de  $M_t$ , uma força axial de 200 [kgf].
- 3) Resolva novamente o exercício 1, usando agora uma união eixo-cubo com interferência longitudinal.
- 4) Uma polia bipartida de ferro fundido deve ser unida por atrito a um eixo de aço para transmitir um momento de torção de 5000 [kgf.cm]. São dados:

Diâmetro do eixo	$d = 60$ [mm]
Parafusos da união M12	$\sigma_{adm} = 945$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]
	$d_p = 12$ [mm]
	$d_{pi} = 9,73$ [mm]
Coefficiente de atrito	$\mu = 0,20$ [-]

- 5) Dimensione a união entre um eixo e um cubo, ambos de aço, usando assento cônico. Dados:

Momento de torção	$M_t = 3000$ [kgf.cm]
Diâmetro médio	$d_{med} = 50$ [mm]
Tipo de união	fácil desmontagem

6) Uma polia bipartida de ferro fundido deve ser unida a um eixo de aço para transmitir um momento de torção  $M_t = 5.000 \text{ [kgf.cm]}$ . São dados:

Diâmetro do eixo	$d = 60 \text{ [mm]}$
Parafusos usados na união	$d_p = 12 \text{ [mm]}$
	$d_{pi} = 9,73 \text{ [mm]}$
	$S_i = 74,3 \text{ [mm}^2\text{]}$
Material do parafuso	St 3813, $\sigma_{adm} = 9,45 \text{ [kgf/mm}^2\text{]}$
Coefficiente de atrito	$\mu = 0,2 \text{ [-]}$
Pressão específica admissível do material do cubo	$p_{adm} = 300 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$

7) Um eixo de aço deve ser unido a uma polia de aço por meio de ajuste forçado transversal para transmitir um  $M_t = 5000 \text{ [kgf.cm]}$ . Defina o ajuste necessário para a união. São dados:

Diâmetro do eixo	$d = 40 \text{ [mm]}$
Diâmetro do cubo	$D = 80 \text{ [mm]}$
Comprimento do cubo	$L = 50 \text{ [mm]}$

8) Usando os dados do exercício anterior, determine o ajuste necessário se a união for feita por meio de ajuste forçado longitudinal.

9) Dimensione a união entre um cubo de aço e um eixo de aço por meio de assento cônico, para obter fácil desmontagem e transmitir um  $M_t = 5000 \text{ [kgf.cm]}$ . São dados:

Diâmetro médio do eixo	$d_{med} = 40 \text{ [mm]}$
Coefficiente de atrito	$\mu = 0,2 \text{ [-]}$

10) Uma polia bipartida deve ser acoplada a um eixo de diâmetro  $d = 60 \text{ [mm]}$  para a transmissão por atrito de um momento de torção  $M_t = 3.000 \text{ [kgf.cm]}$ . O eixo é de aço e a polia de ferro fundido. Pretende-se usar 6 parafusos M12 (3 de cada lado; ver dimensões no enunciado do exercício 6 acima) na fixação das duas partes da polia. Pede-se:

- verifique a resistência dos parafusos se a sua tensão admissível for:  $\sigma_{adm} = 500 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$ ;
- determine o comprimento do cubo da polia.

11) Determine o ajuste necessário para a união de uma engrenagem e um eixo por ajuste forçado transversal por aquecimento do cubo, a fim de transmitir um momento de torção de valor  $M_t = 1500 \text{ [kgf.cm]}$ . São dados:

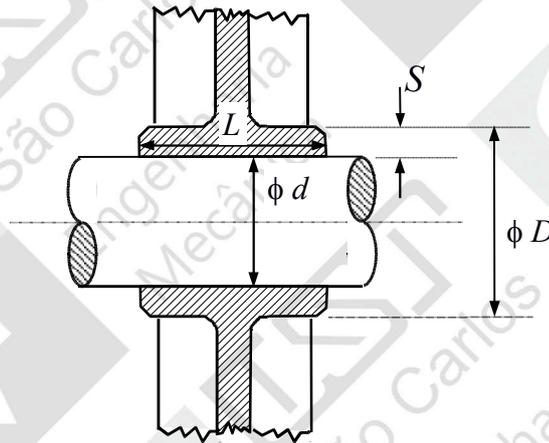
Diâmetro do eixo	$d = 20 \text{ [mm]}$
Diâmetro do cubo	$D = 35 \text{ [mm]}$
Comprimento do cubo	$L = 20 \text{ [mm]}$
Material do eixo e do cubo	aço
Tipo de carga	constante

12) Determine qual a força tangencial  $U$  (mínima e máxima) que pode ser transmitida pela união de um eixo e um cubo por meio de ajuste forçado longitudinal, quando o ajuste definido para a união for  $H_7z_6$ . São dados:

Diâmetro do eixo	$d = 20 \text{ [mm]}$
Diâmetro do cubo	$D = 35 \text{ [mm]}$
Comprimento do cubo	$L = 20 \text{ [mm]}$
Material do eixo e do cubo	aço

## 8.2 Exercícios resolvidos

### Exercício 1



#### a) Dimensões principais

O projeto de elementos de máquinas segue quase que invariavelmente a sequência: primeiro atribuem-se dimensões (sempre que possível obedecendo às normas ABNT ou DIN) e depois se verifica se elas são suficientes. No caso de cubos isto também acontece. As seguintes expressões são utilizadas para estimar as dimensões do cubo e, conseqüentemente, poder fazer o croqui inicial da união (atenção para as unidades:  $M_t$  em  $[kgf.cm]$ ):

$$L = x \cdot \sqrt[3]{M_t} \text{ [cm]} \quad S = y \cdot \sqrt[3]{M_t} \text{ [cm]} \quad D = d + 2.S \text{ [cm]}$$

Os valores de  $x$  e  $y$  são dados na tabela 18.1 [4, pg 61]. Neste caso obtém-se  $x = (0,21$  a  $0,35)$  para cubos de aço e união por atrito (ajuste térmico e forçado) e adota-se  $x = 0,28$ .

Da mesma forma,  $y = (0,18$  a  $0,26)$  e adota-se  $y = 0,22$ . Estima-se então:

$$L = x \cdot \sqrt[3]{M_t} = 0,28 \times \sqrt[3]{1000 [kgf.cm]} = 2,8 [cm] \quad \text{recomenda-se assumir } L = 30 [mm]$$

$$S = y \cdot \sqrt[3]{M_t} = 0,22 \times \sqrt[3]{1000 [kgf.cm]} = 2,2 [cm] = 22 [mm]$$

$$D = d + 2.S = 40 [mm] + 2 \times 22 [mm] = 84 [mm]$$

#### b) Força tangencial $U$

A seguir calcula-se a força tangencial no eixo devida ao momento de torção:

$$U = \frac{2 \cdot M_t}{d} = \frac{2 \times 100 [N.m]}{0,04 [m]} = 5000 [N]$$

#### c) Comprimento mínimo do cubo $L_{min}$

Para evitar esmagamento na interface entre eixo e cubo deve-se ter a pressão específica menor ou igual à pressão admissível ( $p \leq p_{adm}$ ). Isto leva ao valor mínimo da largura do cubo.

$$L_{min} = \frac{P_s}{p_{adm} \cdot d} \quad , \quad \text{com } P_s = \frac{U}{\pi \cdot \mu}$$

Assume-se o coeficiente de atrito  $\mu = (0,15$  a  $0,30) \Rightarrow 0,2$  e a pressão específica admissível  $p_{adm} = (50$  a  $90 [MPa]) \Rightarrow 70 [MPa]$  para aço. A tabela 11.4 [4, pg 185], que em tese serve para pressão específica em pinos, também pode ser usada como referência para valores mais precisos. A

força de separação do cubo será:  $P_s = \frac{5000 [N]}{\pi \times 0,2 [-]} = 7957,747 [N]$

e o comprimento do cubo:  $L_{\min} = \frac{7957,747[N]}{70 \times 10^6 [Pa] \times 0,04 [m]} = 2,842 \times 10^{-3} [m] = 2,842 [mm]$

O comprimento do cubo deve ser maior que qualquer  $L_{\min}$  usado em cálculos de verificação. Também deve ser no mínimo igual à largura da polia ou engrenagem e no máximo o dobro dela. No presente caso, tem-se  $L \gg L_{\min}$

#### d) Forças de deslizamento $H_R$ e de retenção $H$

Para que a união por atrito funcione, é necessário que a força tangencial aplicada  $U$  seja menor ou igual à força de deslizamento  $H_R$ . No limite:

$H_R = U$ . A força de deslizamento neste caso é dada por  $H_R = U = 5000 [N]$

$H_R = 0,47 H$ , assim a força de retenção é:

$$H = \frac{H_R}{0,47} = \frac{5000 [N]}{0,47} = 10638,298 [N]$$

#### e) Interferência mínima necessária $u_m$

Calcula-se a seguir qual a mínima interferência necessária  $u_m$  para transmitir a força de retenção, ou seja, suportar a força tangencial. Usam-se  $L$  e  $D$  estimados acima.

$$u_m = \frac{H}{q_1 \cdot L \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^e \right]} = \frac{10638,298 [N]}{5 \times 10^4 \times 10^6 [Pa] \times 0,030 [m] \times \left[ 1 - \left( \frac{0,040 [m]}{0,084 [m]} \right)^2 \right]} = 9,172 \times 10^{-6} [m]$$

$$u_m = 9,172 [\mu m]$$

sendo que os valores de  $e = 2$  e  $q_1 = 5 \times 10^4 [MPa]$ , foram obtidos na tabela 18.4 [4, pg 66].

#### f) Interferência elástica máxima $u_e$

Tem-se que manter a união por atrito dentro do regime elástico. Na tabela 18.4 (atenção para as unidades)  $u_e = \frac{d \cdot 3,5}{1000} = \frac{40 [mm] \times 3,5}{1000} = 140 [\mu m]$ , portanto  $u_m < u_e$

#### g) Ajuste ideal

Inicialmente calcula-se a interferência relativa

$$\frac{1000 \cdot u_m}{d} = \frac{1000 \times 0,009172 [mm]}{40 [mm]} = 0,229 [-]$$

Com este valor, entra-se na tabela [4, pag. 66, cap 18] e encontra-se o ajuste  $H_7S_6$ . Faz-se então a verificação.

40  $H_7S_6$  resulta nas dimensões:

- eixo -  $40_{+43}^{+59}$
- cubo -  $40_0^{+25}$

Logo  $u_{\max \text{ ajuste}} = 40,059 - 40,000 = 59 \mu m < u_e$

$u_{\min \text{ ajuste}} = 40,043 - 40,025 = 18 \mu m > u_m$

Portanto, o ajuste  $H_7S_6$  satisfaz.

#### h) Temperatura de montagem $T$

Levando-se em conta a folga para montagem, tem-se a interferência total necessária:

$$u_{total} = u_{máxaj} + u_f; \quad u_f = \frac{d}{1000} = \frac{40[mm]}{1000} = 40[\mu m]; \quad u_{total} = 59[\mu m] + 40[\mu m] = 99[\mu m]$$

Note-se que neste caso não é necessário que  $u_{total} < u_e$ , pois ela só é obtida com dilatação térmica e não com deformação elástica. Ela só é usada para a montagem.

A dilatação térmica relativa é: 
$$\frac{u_{total}}{d} = \frac{99[\mu m]}{40[mm] \times 1000[\mu m/mm]} = 2,475 \times 10^{-3} [-]$$

Pela figura 18.5 [4, pag 65], para cubo de aço, obtem-se  $\Delta T = 220$  [°C]. Tem-se então a temperatura de montagem  $T_{montagem} = T_{ambiente} + \Delta T = 25$  [°C] + 220 [°C] = 245 [°C]. Para esta temperatura o aquecimento pode ser feito através de banho em óleo quente. A máxima interferência conseguida por este método é  $\frac{3,5 \cdot d}{1000} = 140[\mu m] > u_{total}$