

Órgãos de Máquinas

Tribologia – Aula TP 4

Carlos M. C. G. Fernandes

1 Exercício

Considere o moto-redutor de dois andares da Figura 1 usado numa máquina ferramenta. Em cada andar de redução é possível seleccionar uma das duas velocidades disponíveis através de um mecanismo de garfo selector e crabot, tendo assim disponíveis um total de 4 velocidades de saída.

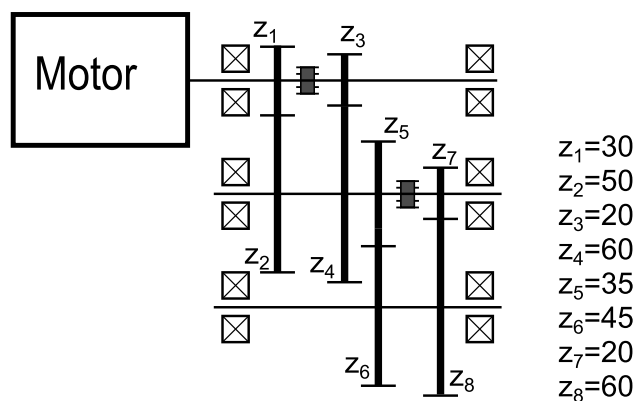


Figura 1: Esquema do moto-redutor.

O moto-redutor apresenta as seguintes características:

- motor com uma potência de 1 kW rodando a uma velocidade constante de 2800 rpm;
- as engrenagens foram talhadas com uma ferramenta com um módulo nominal de 2 mm, ângulo de pressão de $\alpha = 20^\circ$ e têm uma largura de dentado de 20 mm;
- as engrenagens foram talhadas em aço de cementação com um módulo de Young de $E = 206 \text{ GPa}$ e um coeficiente de Poisson de $\nu = 0.3$;

- as engrenagens foram retificadas e possuem uma rugosidade composta $\sigma = 0.5 \mu\text{m}$;
- os veios são suportados por rolamentos de esferas.

Selecione o grau de viscosidade ISO VG do lubrificante a usar neste moto-redutor usando as equações de Cheng e admitindo que a temperatura de funcionamento do lubrificante é de 80°C .

1.1 Razão de transmissão

Quando o moto redutor tem z_1 e z_2 engrenado, cujo valor de razão de transmissão é $u_1 = \frac{z_2}{z_1} = \frac{50}{30} = 1.667$, pode ter as seguintes razões de transmissão total à saída da caixa:

- $u_t = \frac{z_2}{z_1} \frac{z_6}{z_5} = \frac{50}{30} \frac{45}{35} = 2.143$
- $u_t = \frac{z_2}{z_1} \frac{z_8}{z_7} = \frac{50}{30} \frac{60}{20} = 5$

Quando o moto redutor tem z_3 e z_4 engrenado, cujo valor de razão de transmissão é $u_1 = \frac{z_4}{z_3} = \frac{60}{20} = 3$, pode ter as seguintes razões de transmissão total à saída da caixa:

- $u_t = \frac{z_4}{z_3} \frac{z_6}{z_5} = \frac{60}{20} \frac{45}{35} = 3.856$
- $u_t = \frac{z_4}{z_3} \frac{z_8}{z_7} = \frac{60}{20} \frac{60}{20} = 9$

Assim podemos concluir que no 1º andar o par mais solicitado é z_3/z_4 . No 2º andar a engrenagem mais solicitada é a z_8/z_7 quando z_3/z_4 estão engrenados.

1.2 Velocidade angular dos veios

O veio 1 tem uma velocidade angular:

$$n_1 = 2800 \text{ rpm} = 293.215 \text{ rad s}^{-1} \quad (1)$$

O veio 2, quando z_3/z_4 está accionada, tem uma velocidade angular:

$$u_1 \cdot n_2 = 2800 \text{ rpm} \Leftrightarrow n_2 = 933.3 \text{ rpm} = 97.738 \text{ rad s}^{-1} \quad (2)$$

O veio 3, quando z_8/z_7 e z_3/z_4 estão accionadas, tem uma velocidade angular:

$$u_t \cdot n_3 = 2800 \text{ rpm} \Leftrightarrow n_3 = 311.1 \text{ rpm} = 32.579 \text{ rad s}^{-1} \quad (3)$$

1.3 Binário nas engrenagens

$$T_{z_3} = \frac{P}{\omega_1} = \frac{1000}{293.215} = 3.410 \text{ Nm} \quad (4)$$

$$T_{z_4} = T_{z_7} = \frac{P}{\omega_2} = \frac{1000}{97.738} = 10.231 \text{ Nm} \quad (5)$$

$$T_{z_8} = \frac{P}{\omega_3} = \frac{1000}{32.579} = 30.694 \text{ Nm} \quad (6)$$

1.4 Velocidade tangencial

Consultando a Tabela 13 do formulário de Tribologia, sabemos que a velocidade tangencial se calcula como:

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot u \cdot a \cdot n_2}{60 \cdot (u + 1)} \quad (7)$$

Para a engrenagem z_3/z_4 , $C = m \frac{z_3+z_4}{2} = 2 \frac{20+60}{2} = 80 \text{ mm} = 0.08 \text{ m}$, logo:

$$V = \frac{2\pi \times 3 \times 0.08 \times 933.3}{60(3+1)} = 5.864 \text{ m s}^{-1} \quad (8)$$

Para a engrenagem z_7/z_8 , $C = m \frac{z_7+z_8}{2} = 2 \frac{20+60}{2} = 80 \text{ mm} = 0.08 \text{ m}$, logo:

$$V = \frac{2\pi \times 3 \times 0.08 \times 311.1}{60(3+1)} = 1.955 \text{ m s}^{-1} \quad (9)$$

1.5 Espessura específica de filme crítica

A Figura 2 permite obter a espessura específica de filme que garante uma probabilidade de avaria inferior a 5%.

No caso da engrenagem z_3/z_4 é $\Lambda_{5\%} = 0.85$

No caso da engrenagem z_7/z_8 é $\Lambda_{5\%} = 0.5$

1.6 Fórmula de Cheng

$$G = \frac{3.4 \times 10^{-4} \cdot (u \cdot a \cdot \sin \alpha)^{1.5} E^{0.148}}{(u + 1)^2} = 2.395 \times 10^{-5} \quad (10)$$

$$E = 2 \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]^{-1} = 226.374 \times 10^9 \text{ Pa} \quad (11)$$

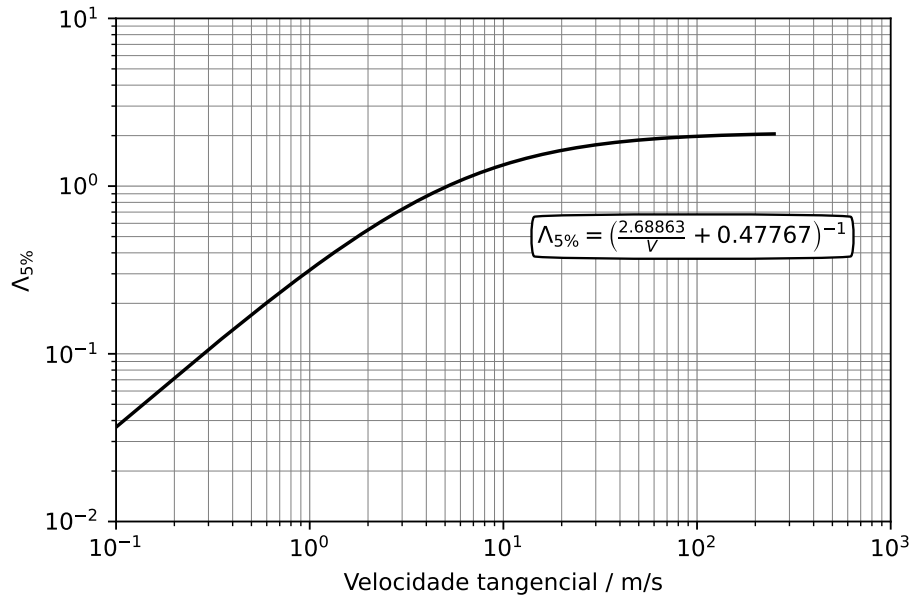


Figura 2: Valor crítico de Λ em função da velocidade tangencial para uma probabilidade de avaria de 5%

$$\frac{W_t}{l} = \frac{T_2 \cdot (u + 1)}{u \cdot a \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot \cos^2 \beta} = \frac{30.694(3 + 1)}{3 \times 0.08 \times 0.02 \cos(\pi/9) \cos^2(0)} = 27\,219.894 \text{ Nm}^{-1} \quad (12)$$

A espessura de filme, segundo Cheng, é dada pela equação (13)

$$h = \left[G \cdot LP \cdot N \cdot \left(\frac{W_t}{l} \right)^{-0.148} \right]^{0.74} \quad (13)$$

Sendo que $\sigma = 0.5 \mu\text{m}$, a espessura específica de filme é finalmente dada por:

$$\Lambda = \frac{h}{\sigma} \quad (14)$$

$$0.5 \times 0.5 = \left[G \cdot LP \cdot N \cdot \left(\frac{W_t}{l} \right)^{-0.148} \right]^{0.74} \quad (15)$$

$$LP = 93.45 \text{ s} \quad (16)$$

Consultando a Figura 3, o lubrificante com o grau ISO VG 460 cumpre o requisito do parâmetro do lubrificante calculado.

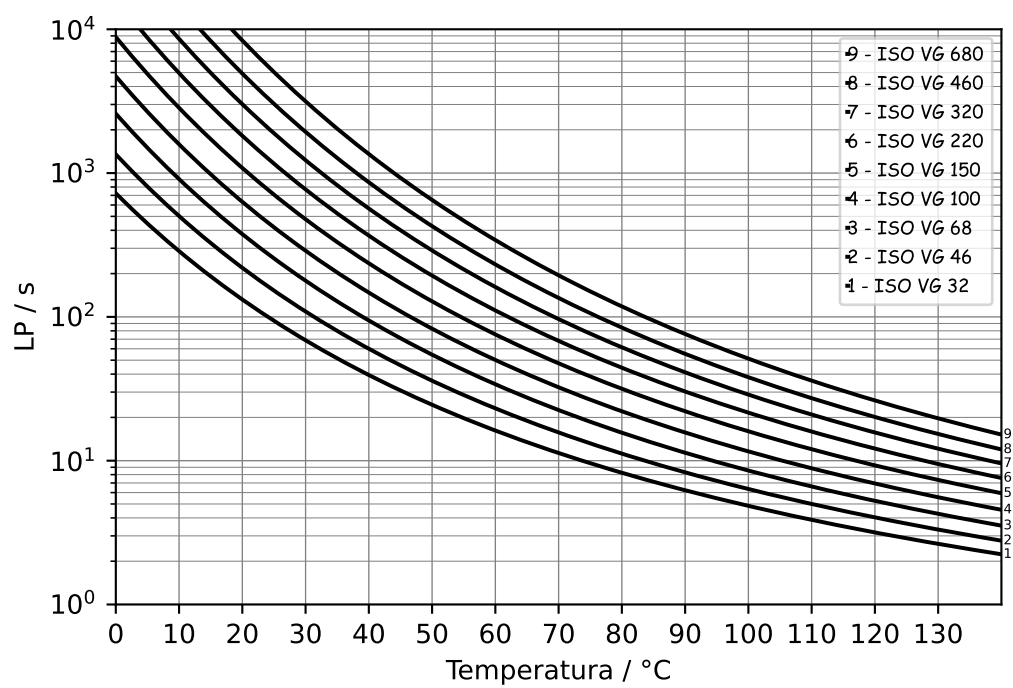


Figura 3: Parâmetro do lubrificante de lubrificantes ISO VG.