

Órgãos de Máquinas

Tribologia – Aula TP 2

Carlos M. C. G. Fernandes

1 Exercício

Considere a chumaceira radial hidrodinâmica com as dimensões $D = 0.04\text{ m}$, $L = 0.01\text{ m}$, funcionando com a folga radial de $C = 20\mu\text{m}$ e a uma velocidade de rotação de $n = 4000\text{ rpm}$. A carga aplicada, de direção constante, é de $W = 5000\text{ N}$.

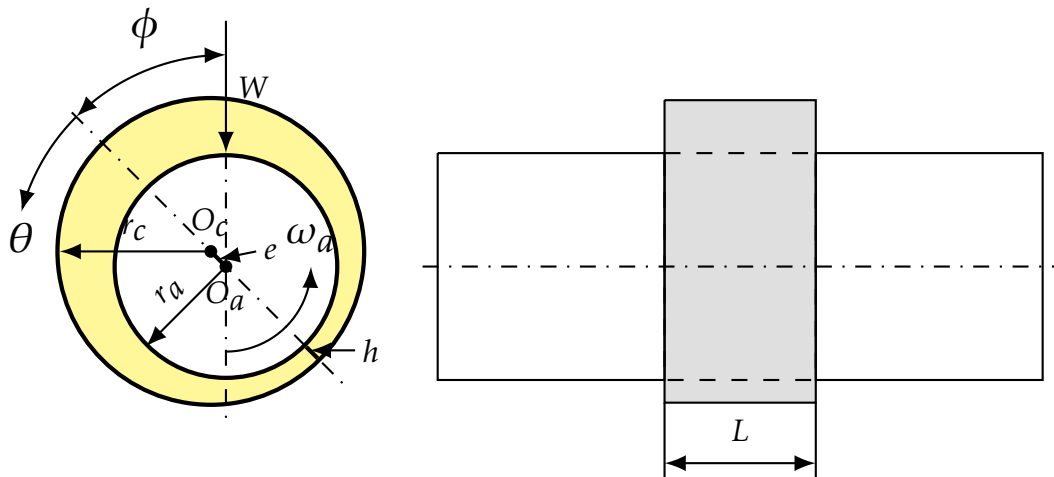


Figura 1: Chumaceira radial lisa.

O lubrificante usado é um ISO VG 46 ($\rho = 875\text{ kg m}^{-3}$, $cp = 2000\text{ J/(kgK)}$), sendo injetado à temperatura de $T_0 = 30^\circ\text{C}$. Considere que o coeficiente de dissipação nos maciços é $\alpha = 0.8$.

1. Determine a temperatura de funcionamento da chumaceira
2. Altura mínima de filme - h_{min}

3. Ângulo de posicionamento - ϕ
4. Caudal de alimentação - Q
5. Binário de atrito no veio - C_a
6. Potência dissipada devido ao atrito

Nota: a temperatura típica de funcionamento habitualmente encontra-se entre os 40 °C e os 100 °C

1.1 Características geométricas da chumaceira

O rácio comprimento diâmetro da chumaceira é:

$$\frac{L}{D} = \frac{0.01}{0.04} = \frac{1}{4} \quad (1)$$

Assim podemos concluir que para $\frac{1}{6} < \frac{L}{D} < 4$ consideramos a chumaceira de comprimento finito e deveremos consultar a Tabela 1 com a solução numérica.

Tabela 1: $\frac{L}{D} = \frac{1}{4}$

ϵ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
S	16.2	7.57	4.49	2.83	1.78	1.07	0.58	0.263	0.0728	0.0221
ϕ	82.5	75.5	68.5	61.5	54	47	39.5	31.5	21.5	15.5
$\frac{R}{c} \cdot f_a$	307	140	82.5	52.67	34.25	21.85	13.19	6.97	2.7	1.2
$\frac{Q}{L \cdot c \cdot V}$	0.0983	0.196	0.295	0.393	0.491	0.59	0.688	0.787	0.885	0.933
$\overline{C_a}$	18.95	18.49	18.37	18.61	19.24	20.42	22.74	26.50	37.09	54.30

A folga radial da chumaceira é $C = 20 \mu\text{m} = 20 \times 10^{-6} \text{m}$

1.2 Comportamento térmico da chumaceira

O comportamento térmico da chumaceira permite conhecer a temperatura em 3 pontos distintos: lubrificante que sai pelos bordos (T_e), temperatura média do filme lubrificante responsável pela geração de pressão (T_i) e a temperatura após saída do contacto (T_2) - ver Figura 2.

A temperatura máxima do lubrificante é calculada pela equação (2).

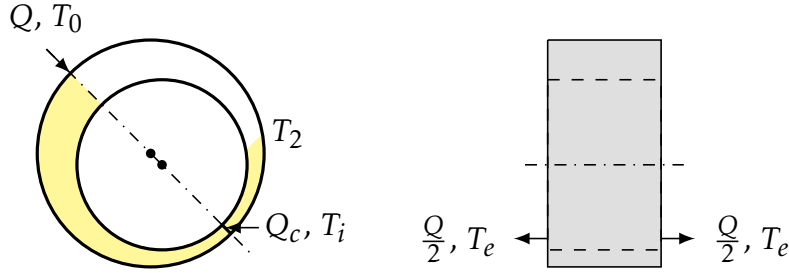


Figura 2: Problema térmico da chumaceira radial.

$$T_2 = T_0 + \frac{\alpha \cdot P_a \cdot (Q + Q_c)}{\rho \cdot c_p \cdot Q \cdot \left(\frac{Q}{2} + Q_c\right)} \quad (2)$$

A temperatura do lubrificante que sai pelos bordos é calculado como:

$$T_e = \frac{T_0 \cdot Q + T_2 \cdot Q_c}{Q + Q_c} \quad (3)$$

A temperatura média do filme lubrificante, a considerar para o cálculo das características de funcionamento da chumaceira radial é dada pela equação (4).

$$T_i = \frac{T_e + T_2}{2} \quad (4)$$

Para prever o comportamento térmico da chumaceira radial temos de conhecer o caudal axial Q que sai pelos bordos da chumaceira, e por isso deverá ser igual ao caudal de fornecimento à chumaceira.

Por outro lado apenas o lubrificante que passa pelo convergente com um caudal Q_c está sujeito à temperatura T_i . Neste caso o caudal é calculado como:

$$Q_c = h_{min} \cdot L \cdot \frac{V}{2} \quad (5)$$

1.3 Procedimento de cálculo

O procedimento de cálculo é iterativo, pelo que requer arbitrar uma temperatura inicial para o filme lubrificante T_i e um método recursivo para as iterações seguintes.

Principiamos por escolher a temperatura de alimentação T_0 , que neste caso é conhecida e igual a 30 °C.

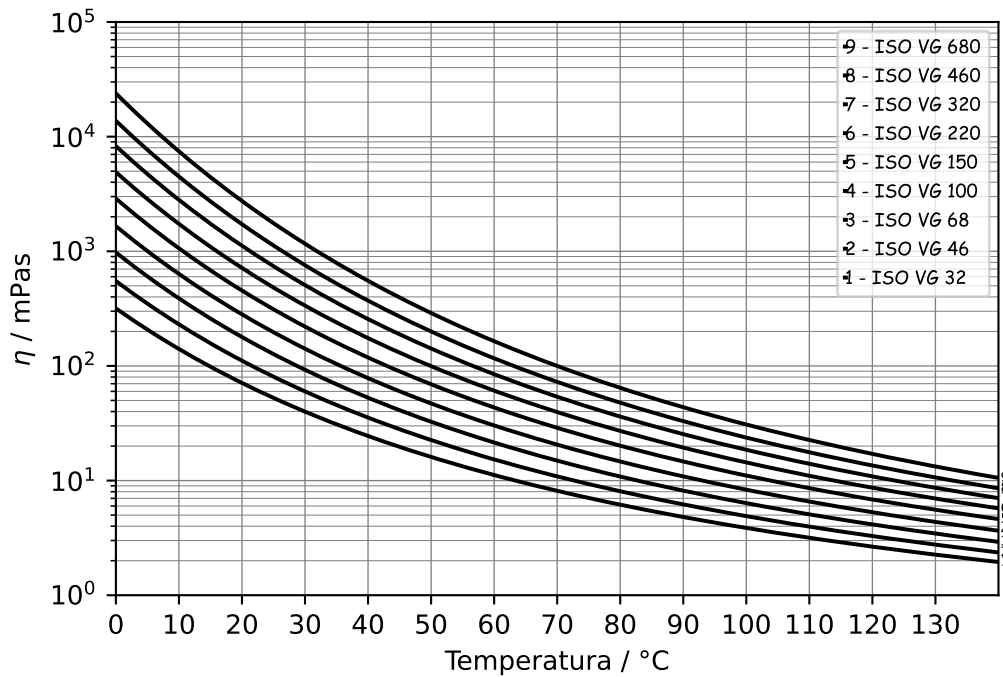


Figura 3: Viscosidade dinâmica de lubrificantes ISO VG.

Para a primeira iteração vamos considerar que a temperatura média do filme é $T_i = T_0$ e assim podemos determinar as condições de funcionamento da chumaceira para esta temperatura.

1.3.1 1ª iteração $T_i = T_0$

Altura mínima de filme - h_{min}

A altura de filme é dada por:

$$h = c \cdot (1 + \epsilon \cdot \cos \theta) \quad (6)$$

Pelo sistema de eixos da Figura 1, a espessura de filme mínima ocorre quando $\theta = \pi$, logo:

$$h_{min} = c \cdot (1 - \epsilon) \quad (7)$$

Para determinar a excentricidade relativa precisamos primeiro do número de Sommerfeld (equação (8)). A viscosidade média do lubrificante ISO VG 46 para esta temperatura é $\eta = 58.242 \text{ mPa} \cdot \text{s} = 0.0582 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ retirado da Figura 3.

$$S = \left(\frac{R}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot L \cdot V}{\pi \cdot W}\right) = \left(\frac{0.02}{20 \times 10^{-6}}\right)^2 \times \left(\frac{0.0582 \times 0.01 \times 8.378}{\pi \times 5000}\right) = 0.3106 \quad (8)$$

Pela Tabela 1 sabemos que a excentricidade relativa para o número de Sommerfeld calculado está compreendida entre 0.7 e 0.8. Recorrendo a uma interpolação linear entre estas duas colunas, obtemos os seguintes resultados:

$$\begin{cases} \epsilon &= 0.7845 \\ h_{min} &= 4.3005 \times 10^{-6} \text{ m} \\ \phi &= 32.7019^\circ \\ f_a &= 0.007904 \\ C_a &= 0.79044 \text{ Nm} \\ Q &= 1.2937 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ Q_c &= 1.8014 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ P_a &= 331.1 \text{ W} \end{cases} \quad (9)$$

Agora podemos calcular a temperatura T_2 :

$$T_2 = 30 + \frac{0.8 \times 331.1 \times (1.2937 \times 10^{-6} + 1.8014 \times 10^{-7})}{875 \times 2000 \times \left(\frac{1.2937 \times 10^{-6}}{2} + 1.8014 \times 10^{-7}\right) \times 1.2937 \times 10^{-6}} = 238.5^\circ\text{C} \quad (10)$$

Determinar a temperatura que sai pelos bordos:

$$T_e = \frac{30 \times 1.2937 \times 10^{-6} + 238.5 \times 1.8014 \times 10^{-7}}{1.2937 \times 10^{-6} + 1.8014 \times 10^{-7}} = 55.5^\circ\text{C} \quad (11)$$

Calcular a temperatura média do filme lubrificante T_i :

$$T_i = \frac{T_e + T_2}{2} = \frac{55.5 + 238.5}{2} = 147.0^\circ\text{C} \quad (12)$$

E finalmente calculamos o erro relativo do valor obtido face ao valor arbitrado:

$$\delta = \left| \frac{T_{if} - T_{ii}}{T_{ii}} \right| \times 100 = \frac{147.0 - 30}{30} \times 100 = 390\% \quad (13)$$

Agora usamos as bissecções sucessivas para determinar o valor seguinte de T_i :

$$T_i = \frac{T_{if} + T_{ii}}{2} = \frac{147.0 + 30.0}{2} = 88.5^\circ\text{C} \quad (14)$$

1.3.2 2ª iteração $T_i = 88.5^\circ\text{C}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = 0.00625 \text{ Pa s} \\ S = 0.03335 \\ \epsilon = 0.9389 \\ h_{min} = 1.2219 \times 10^{-6} \text{ m} \\ \phi = 16.8314^\circ \\ f_a = 0.001533 \\ C_a = 0.1533 \text{ Nm} \\ Q = 1.5454 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ Q_c = 5.1183 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ P_a = 64.2 \text{ W} \\ T_2 = 66.8^\circ\text{C} \\ T_e = 31.2^\circ\text{C} \\ T_i = 48.99^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (15)$$

E finalmente calculamos o novo erro relativo do valor obtido face ao valor arbitrado:

$$\delta = \left| \frac{T_{if} - T_{ii}}{T_{ii}} \right| \times 100 = \frac{48.99 - 88.5}{88.5} \times 100 = 44.6\% \quad (16)$$

Agora usamos as bissecções sucessivas para determinar o valor seguinte de T_i :

$$T_i = \frac{T_{if} + T_{ii}}{2} = \frac{48.99 + 88.5}{2} = 68.7^\circ\text{C} \quad (17)$$

1.3.3 3ª iteração $T_i = 68.7^\circ\text{C}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = 0.011 \text{ Pa s} \\ S = 0.05869 \\ \epsilon = 0.9139 \\ h_{min} = 1.7218 \times 10^{-6} \text{ m} \\ \phi = 19.8309^\circ \\ f_a = 0.002283 \\ C_a = 0.22827 \text{ Nm} \\ Q = 1.5052 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ Q_c = 7.2124 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ P_a = 95.6 \text{ W} \\ T_2 = 85.5^\circ\text{C} \\ T_e = 32.5^\circ\text{C} \\ T_i = 59.0^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (18)$$

E finalmente calculamos o novo erro relativo do valor obtido face ao valor arbitrado:

$$\delta = \left| \frac{T_{if} - T_{ii}}{T_{ii}} \right| \times 100 = \frac{59.0 - 68.7}{68.7} \times 100 = 14.1 \% \quad (19)$$

Agora usamos as bissecções sucessivas para determinar o valor seguinte de T_i :

$$T_i = \frac{T_{if} + T_{ii}}{2} = \frac{59.0 + 68.7}{2} = 63.9^\circ\text{C} \quad (20)$$

1.3.4 4ª iteração $T_i = 63.9^\circ\text{C}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = 0.01294 \text{ Pa s} \\ S = 0.069 \\ \epsilon = 0.9037 \\ h_{min} = 1.9254 \times 10^{-6} \text{ m} \\ \phi = 21.0526^\circ \\ f_a = 0.002588 \\ C_a = 0.2588 \text{ Nm} \\ Q = 1.4888 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ Q_c = 8.06528 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ P_a = 108.4 \text{ W} \\ T_2 = 93.3^\circ\text{C} \\ T_e = 33.3^\circ\text{C} \\ T_i = 63.3^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (21)$$

E finalmente calculamos o novo erro relativo do valor obtido face ao valor arbitrado:

$$\delta = \left| \frac{T_{if} - T_{ii}}{T_{ii}} \right| \times 100 = \frac{63.3 - 63.9}{68.7} \times 100 = 0.94 \% \quad (22)$$

Agora usamos as bissecções sucessivas para determinar o valor seguinte de T_i :

$$T_i = \frac{T_{if} + T_{ii}}{2} = \frac{63.3 + 63.9}{2} = 63.6^\circ\text{C} \quad (23)$$

1.3.5 5ª iteração $T_i = 63.6^\circ\text{C}$

$$\left\{ \begin{array}{lcl} \eta & = & 0.01308 \text{ Pa s} \\ S & = & 0.06975 \\ \epsilon & = & 0.9030 \\ h_{min} & = & 1.9397 \times 10^{-6} \text{ m} \\ \phi & = & 21.1385^\circ \\ f_a & = & 0.002609 \\ C_a & = & 0.26096 \text{ Nm} \\ Q & = & 1.4877 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ Q_c & = & 8.1252 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ P_a & = & 109.3 \text{ W} \\ T_2 & = & 93.9^\circ\text{C} \\ T_e & = & 33.3^\circ\text{C} \\ T_i & = & 63.6^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (24)$$

Erro relativo:

$$\delta = \left| \frac{T_{if} - T_{ii}}{T_{ii}} \right| \times 100 = \frac{63.6 - 63.6}{68.7} \times 100 = 0\% \quad (25)$$