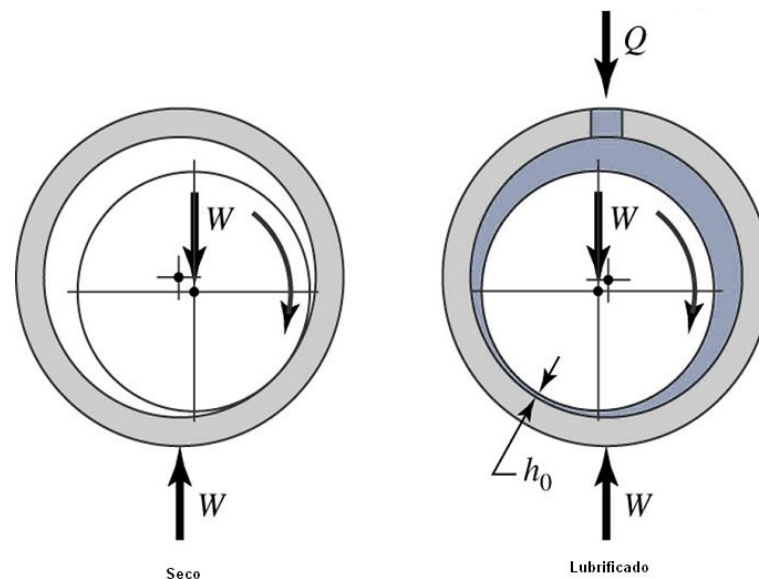


LUBRIFICAÇÃO E MANCAIS RADIAIS

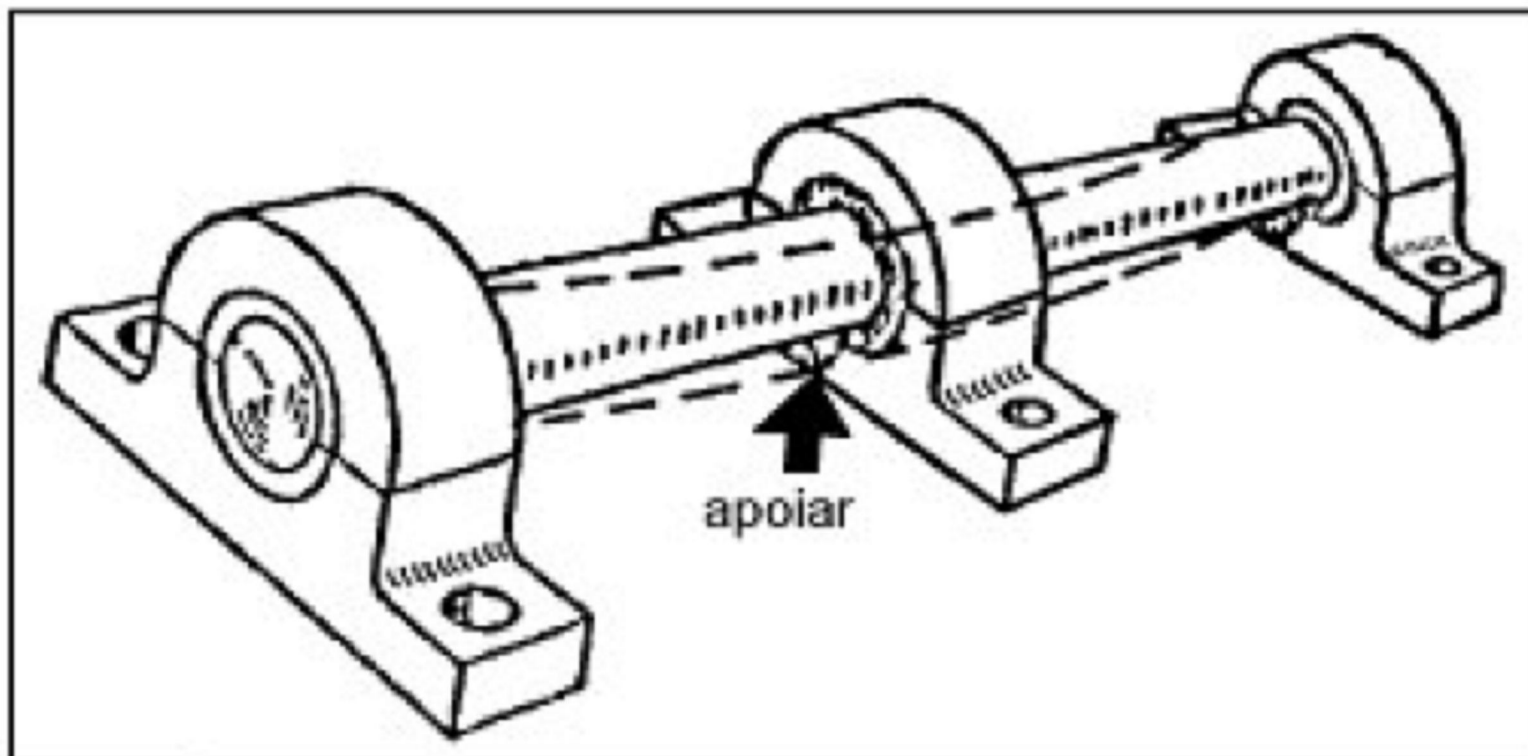
Prof. Alexandre Augusto Pescador Sardá

INTRODUÇÃO

- **Lubrificação**: Reduzir o atrito, o desgaste e o aquecimento das peças que se movem uma em relação às outras.
- **Lubrificante**: Qualquer substância que quando introduzida entre as superfícies em movimento atende estes propósitos.
- Em um mancal de deslizamento, uma **árvore** ou **munhão** gira ou oscila dentro de uma **bucha** ou **mancal** e o movimento relativo é de deslizamento.



INTRODUÇÃO



APLICAÇÃO

- Árvores de manivelas e bielas do motor de automóvel;
- Compressores;
- Motores elétricos;
- Mancais radiais usados em turbina a vapor de uma usina geradora;
- Mancal de náilon que não necessita lubrificação;
- Mancal sinterizado com lubrificação mantida por ele próprio;
- Mancal de bronze com anel de óleo;

TIPOS DE LUBRIFICAÇÃO

- Hidrodinâmica;
- Hidrostática;
- Elastoidrodinâmica;
- Limite;
- Filme sólido;

TIPOS DE LUBRIFICAÇÃO

- **Lubrificação Hidrodinâmica (filme completa):** as superfícies do mancal, que suportam a carga, estão separadas por uma película de lubrificante relativamente espessa prevenindo o contato metal-metal.

A pressão da película é criada pelo movimento das próprias superfícies, impelindo o lubrificante para a zona convergente a uma velocidade suficientemente alta para criar a pressão necessária para separar as superfícies em contato, devido à carga no mancal.

TIPOS DE LUBRIFICAÇÃO

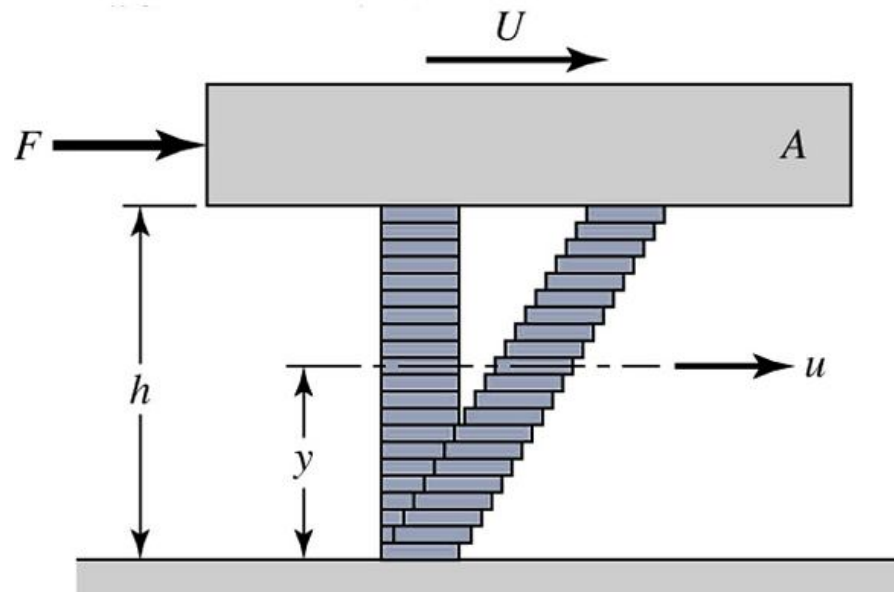
- **Lubrificação Hidrostática:** obtida pela introdução do lubrificante, (óleo, ar, água), dentro da área carregada do mancal, a uma pressão alta, suficiente para separar as superfícies com uma película de óleo relativamente espessa.
- **Lubrificação Elastoidrodinâmica:** fenômeno que ocorre quando o lubrificante é introduzido entre as superfícies que estão em contato de rolamento.
- **Lubrificação Limite:** as maiores asperezas são separadas pela película lubrificante apenas por espessuras moleculares.
 - **Causas;**
 - Queda na velocidade do movimento da superfície;
 - Redução na quantidade do lubrificante fornecida ao mancal;
 - Aumento na carga do mancal;
 - Aumento na temperatura do lubrificante, decrescendo a viscosidade.

TIPOS DE LUBRIFICAÇÃO

- Quando os mancais operam à temperaturas extremas, deve-se usar uma película de lubrificante sólido, tal como a grafita ou o bissulfeto de molibdeno, porque os óleos minerais comuns não são satisfatórios.

VISCOSIDADE

- Película composta por uma série de camadas horizontais e uma força F forçando essas camadas a se deformarem ou deslizarem umas sobre as outras.
- Camada em contato com o corpo em movimento tem velocidade U ;
- Camada em contato com a superfície estacionária tem velocidade zero.
- As camadas intermediárias terão velocidades que dependerão de suas distâncias y da superfície fixa.



Shigley

VISCOSIDADE

- A lei de Newton para fluidos viscosos estabelece que a tensão de cisalhamento no fluido é proporcional a taxa de variação da velocidade com respeito a y .
- Película composta por uma série de camadas horizontais e uma força F forçando essas camadas a se deformarem ou deslizarem umas sobre as outras.
- Camada em contato com o corpo em movimento tem velocidade U ;

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$

- Onde μ é a constante de proporcionalidade e define a viscosidade absoluta;
- du/dy é a taxa de variação da velocidade com a distância e pode ser chamada de grau de cisalhamento ou gradiente de velocidade;
- μ é uma medida da resistência de atrito interno do fluido.

VISCOSIDADE

- Considerando-se o grau de cisalhamento uma constante:

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$$

$$\tau = \mu \frac{U}{h}$$

- Unidade de Viscosidade (Sistema inglês): libra força-segundo por polegada quadrada (o mesmo que pressão multiplicada pelo tempo), **(reyn)**.
- Unidade de Viscosidade (SI): pascal · segundo , chamada de viscosidade dinâmica ou viscosidade absoluta.

$$1 \text{ reyn} = 6890 \text{ Pa.s}$$

VISCOSIDADE

- Poise: unidade cgs de viscosidade dinâmica ou absoluta e sua unidade é o dina-segundo por centímetro quadrado

$$\text{dina}\cdot\text{seg} / \text{cm}^2$$

- Habitual o uso do centipoise (cP) nas análises porque seu valor é mais conveniente. Também designada por Z (cP)

$$\mu(\text{Pa}\cdot\text{s}) = 10^{-3} Z(\text{cP})$$

$$\mu(\text{reyn}) = \frac{Z(\text{cP})}{6,89(10^6)}$$

VISCOSIDADE

- Método padrão ASTM para a determinação de viscosidade usa o Viscosímetro Saybolt Universal, e consiste em medir o tempo, em segundos, para 60 ml de lubrificante escoar, a Temperatura especificada, através de um tubo de 17,6 mm de diâmetro e 12,25 mm de comprimento. O resultado é chamado de viscosidade cinemática (unidade stoke)

$$Z_k = \left(0,22t - \frac{180}{t} \right) \quad (cSt)$$

- No SI a viscosidade cinemática ν tem como unidade o metro quadrado por segundo e a conversão é:

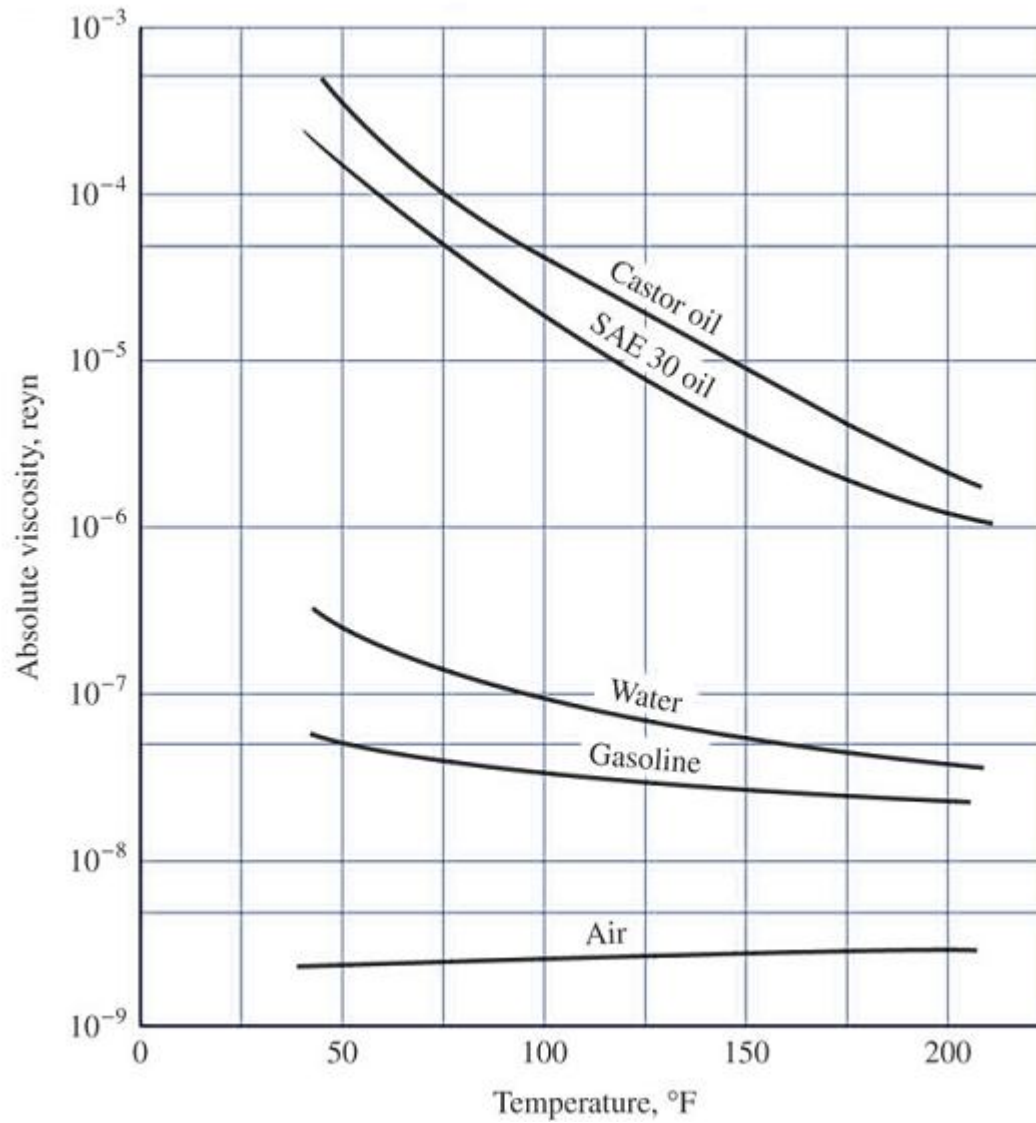
$$\nu (m^2 / s) = 10^{-6} Z_k (cSt)$$

VISCOSIDADE

- Para converter para viscosidade dinâmica, multiplica-se ν pela massa específica:

$$\mu = \rho \left(0,22t - \frac{180}{t} \right) 10^{-6} \quad (Pa.s)$$

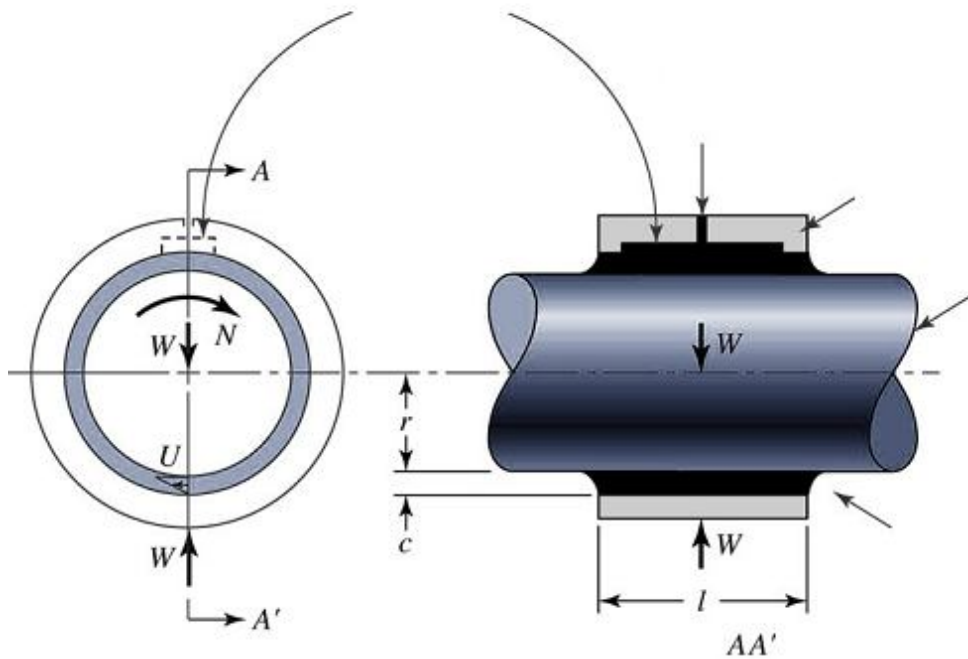
VISCOSIDADE



Shigley

LEI DE PETROFF

- Fenômeno do atrito em um mancal primeiramente explicado por Petroff, admitindo que a árvore e o mancal fossem concêntricos.
- Define grupo de parâmetros adimensionais e coeficiente de atrito considerado por esta lei é uma indicação muito boa mesmo quando a árvore não é concêntrica com o mancal.



Shigley

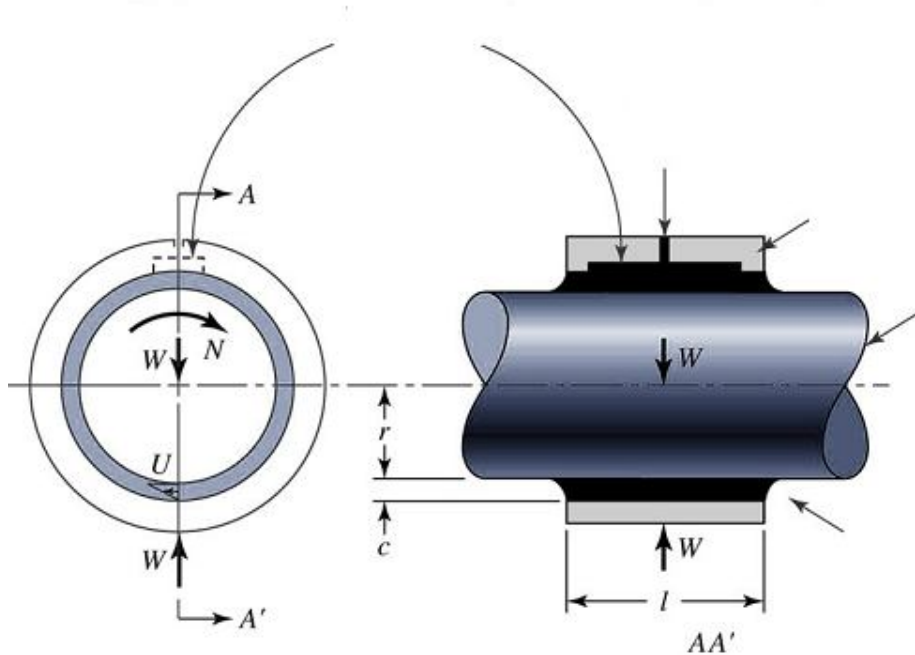
$$\tau = \mu \frac{U}{h} = \frac{2\pi r \mu N}{c}$$

$$T = (\tau A) r = \left(\frac{2\pi r \mu N}{c} \right) (2\pi r l) r$$

$$T = \frac{4\pi^2 r^3 l \mu N}{c}$$

LEI DE PETROFF

- W, força no mancal em Newtons.
- P: pressão por metro quadrado de área projetada;



$$P = \frac{W}{2rl}$$

$$T = f W r = f (2rlP)(r) = 2r^2 f l P$$

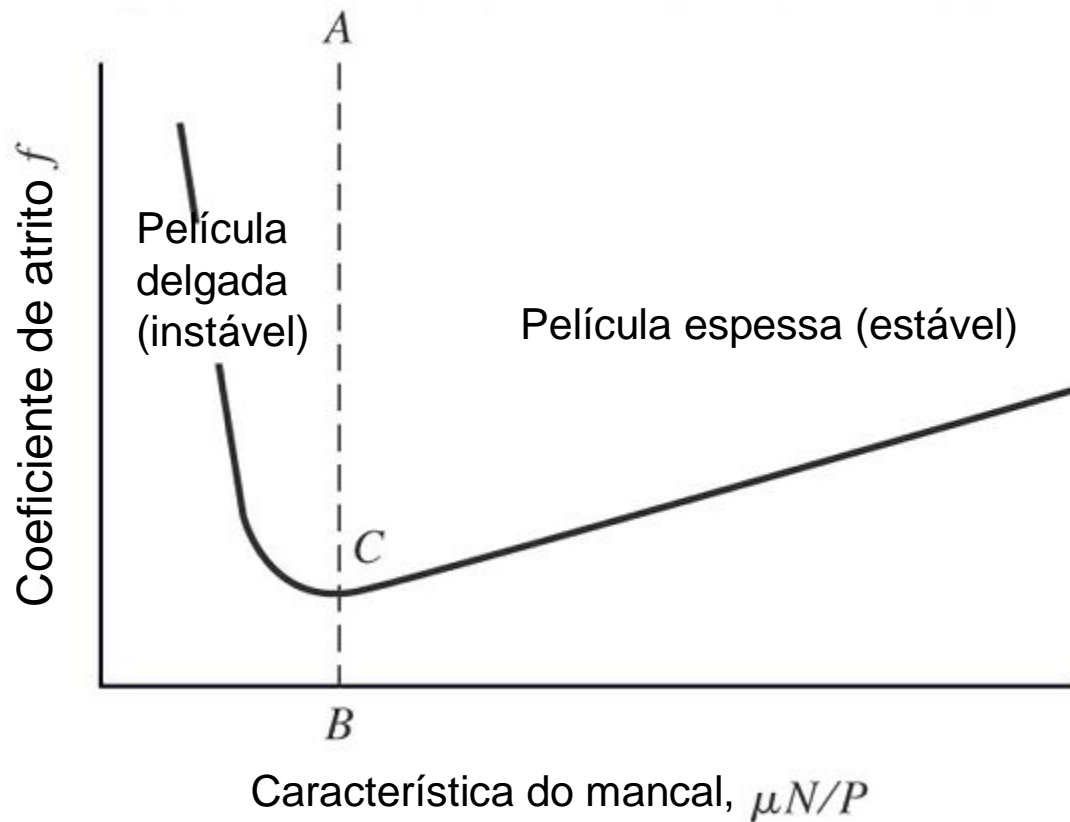
Shigley

$$f = 2\pi^2 \left(\frac{\mu N}{P} \right) \frac{r}{c}$$

Lei de Petroff

LUBRIFICAÇÃO ESTÁVEL

- Operando à direita de BA, aumentando-se a Temperatura, a viscosidade diminui, diminuindo f , o que acarreta menos calor no cisalhamento do lubrificante e, conseqüentemente, a temperatura do lubrificante cai. Assim, as variações são autocorrigidas.

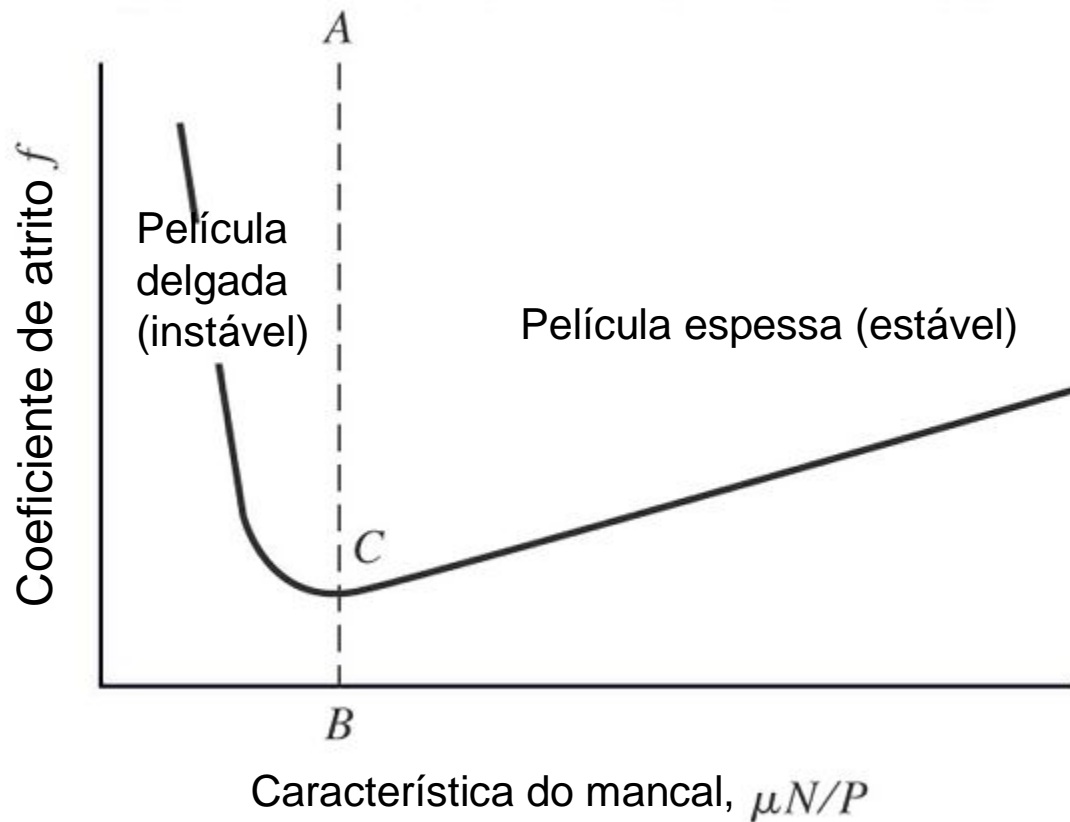


$$f = 2\pi^2 \left(\frac{\mu N}{P} \right) \frac{r}{c}$$

Shigley

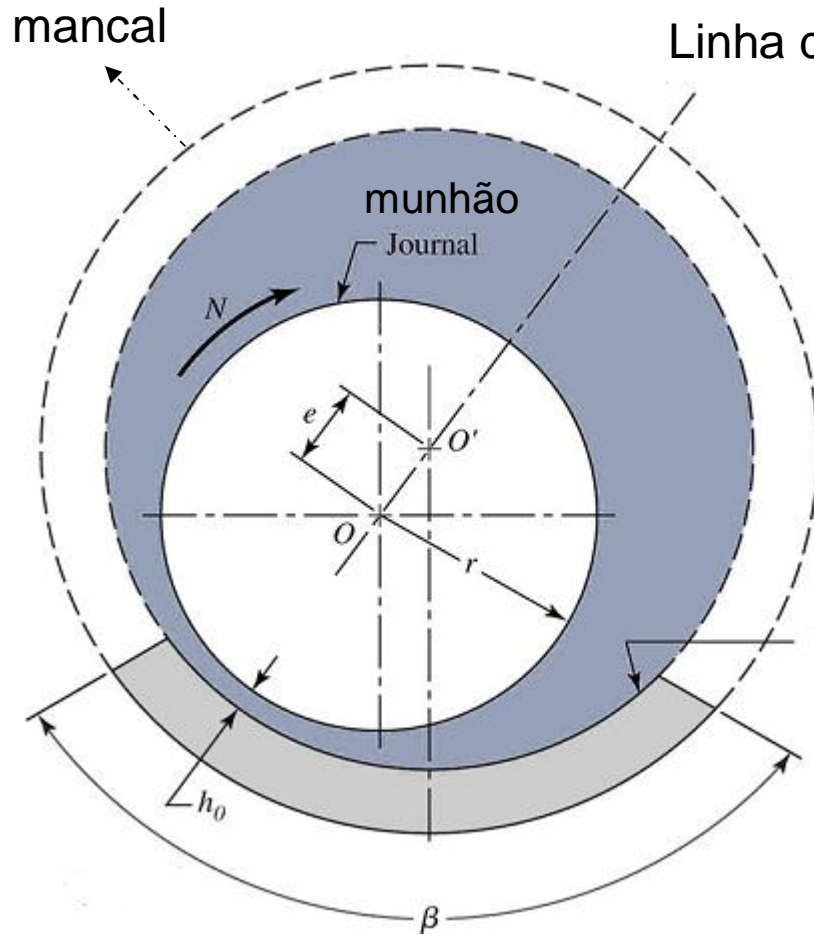
LUBRIFICAÇÃO ESTÁVEL

- Operando à esquerda de BA, aumentando-se a Temperatura, a viscosidade diminui, aumentando f , o que acarreta mais calor no cisalhamento do lubrificante e, conseqüentemente, a temperatura do lubrificante aumentaria ainda mais. Região instável.



Shigley

LUBRIFICAÇÃO COM PELÍCULA ESPESSA



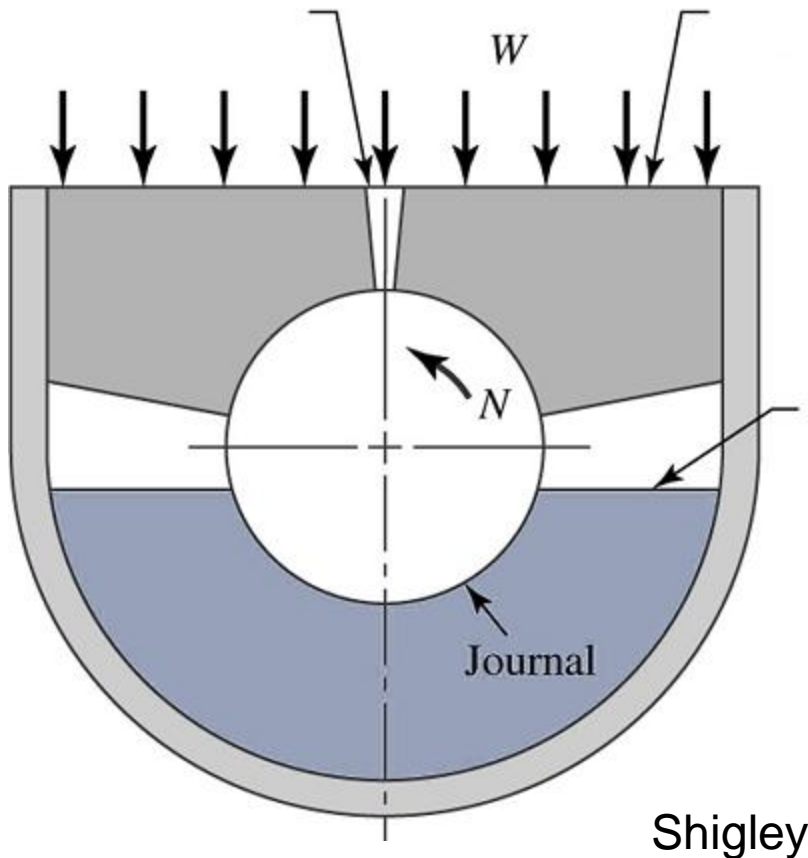
$$\varepsilon = \frac{e}{c}$$

Relação de excentricidade

Shigley

TEORIA HIDRODINÂMICA

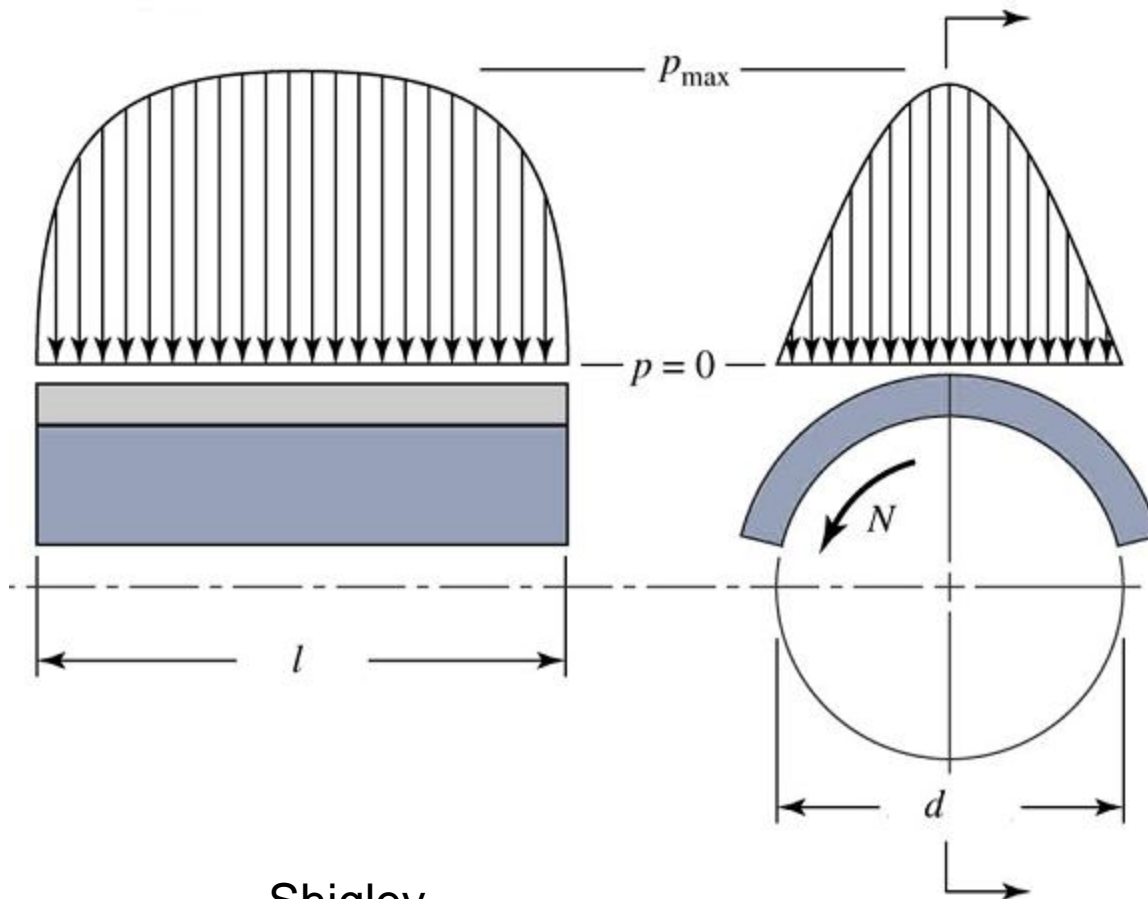
- Originou-se com Beauchamp Tower (1880);
- Óleo fluia para fora do furo lubrificador, mesmo após o uso de um tarugo de madeira no furo.



$$\varepsilon = \frac{e}{c}$$

TEORIA HIDRODINÂMICA

- Pressão superior a 2 vezes a carga do mancal, com a seguinte distribuição:



Shigley

TEORIA HIDRODINÂMICA

•Reynolds:

Suposições:

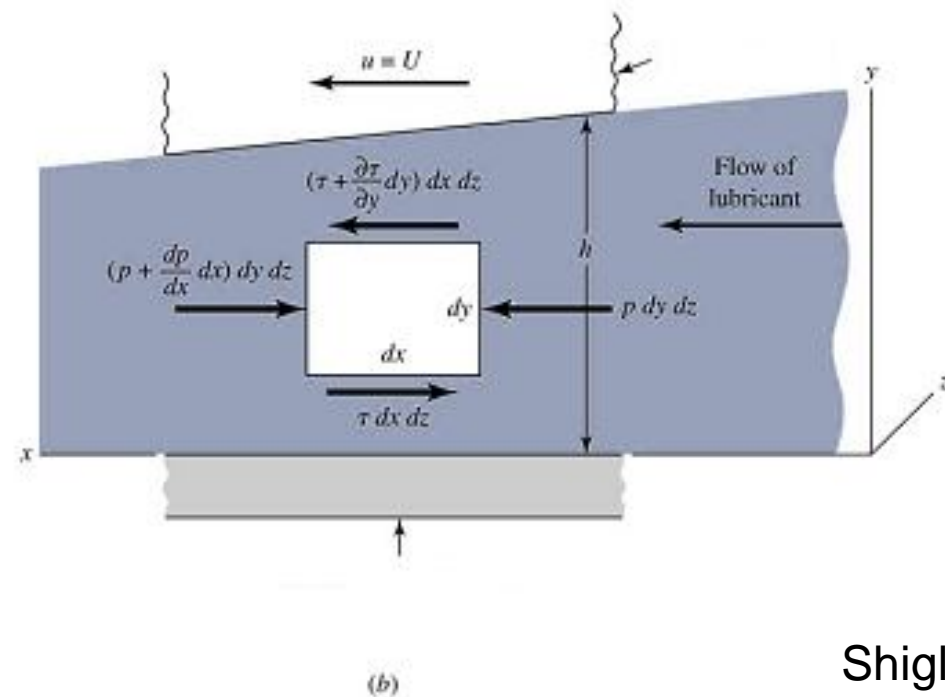
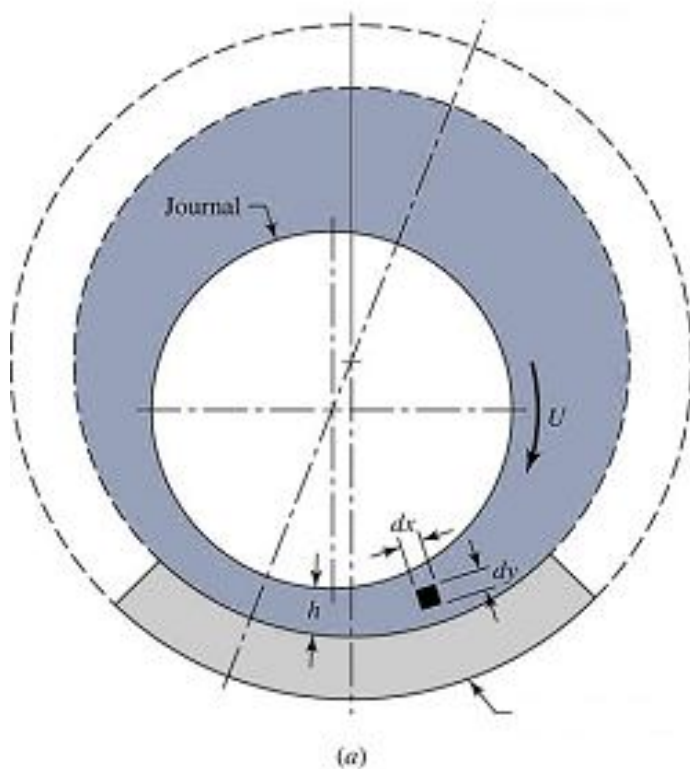
- 1 – O lubrificante obedece as Leis de Newton para escoamento viscoso;
- 2 – Desprezam-se as forças devidas à inércia do lubrificante;
- 3 - Considera-se o lubrificante como incompressível;
- 4 – Considera-se a viscosidade constante em toda a película;
- 5 – A pressão não varia na direção axial;

TEORIA HIDRODINÂMICA

6 – Mancal e árvore infinitos na direção z;

7 – Pressão na película constante na direção y; Pressão depende somente da direção x;

8 – Velocidade de qualquer partícula de lubrificante no filme depende somente das coordenadas x e y.



TEORIA HIDRODINÂMICA

Forças que atuam em um volume elementar:

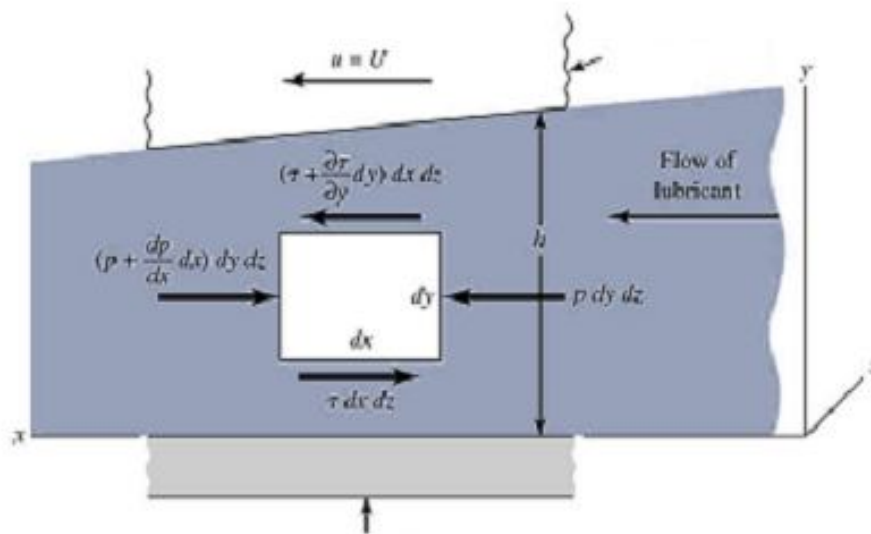
$$\sum F = \left(p + \frac{dp}{dx} dx \right) dy dz + \tau dx dz - \left(\tau + \frac{d\tau}{dy} dy \right) dx dz - p dy dz = 0$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

Mas:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

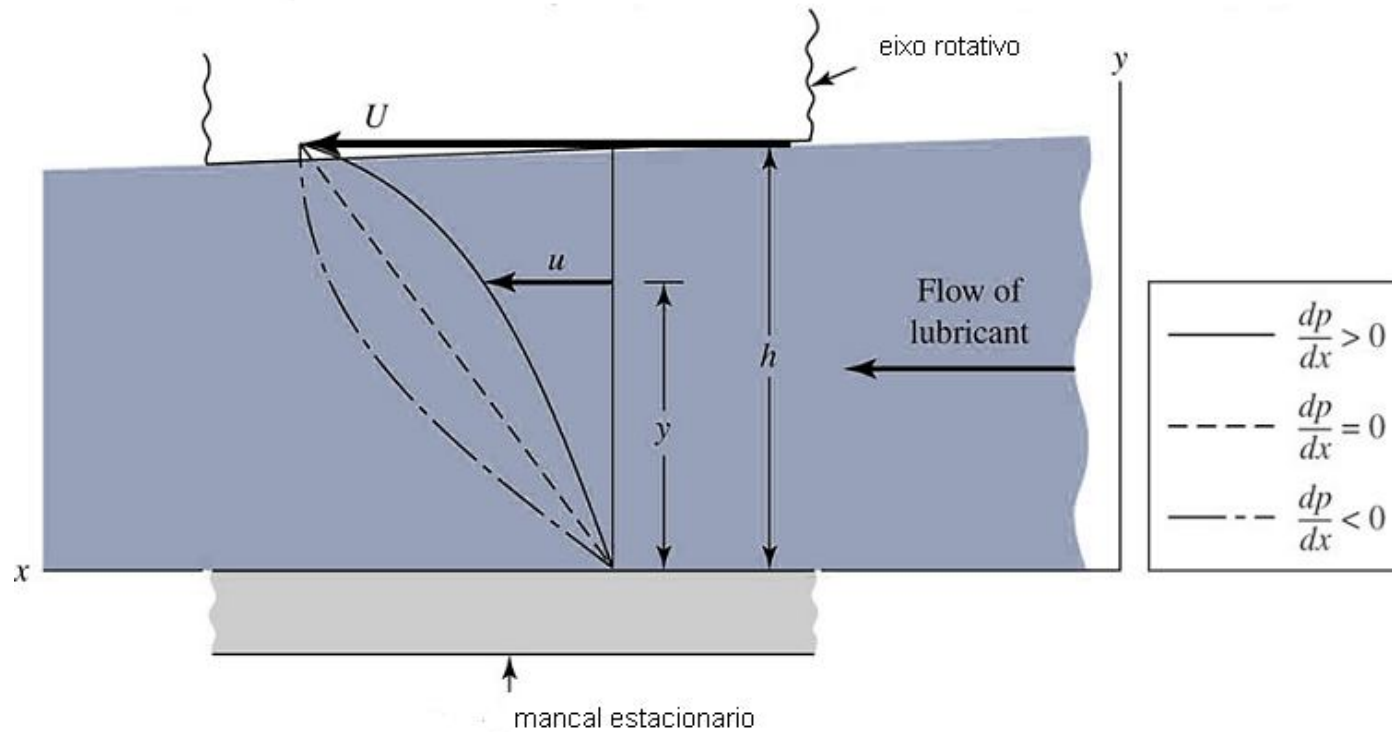
$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$



Shigley

TEORIA HIDRODINÂMICA

Mantendo-se x constante, integra-se esta expressão duas vezes em relação a y :



Shigley

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} y + C_1$$

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + C_1 y + C_2$$

TEORIA HIDRODINÂMICA

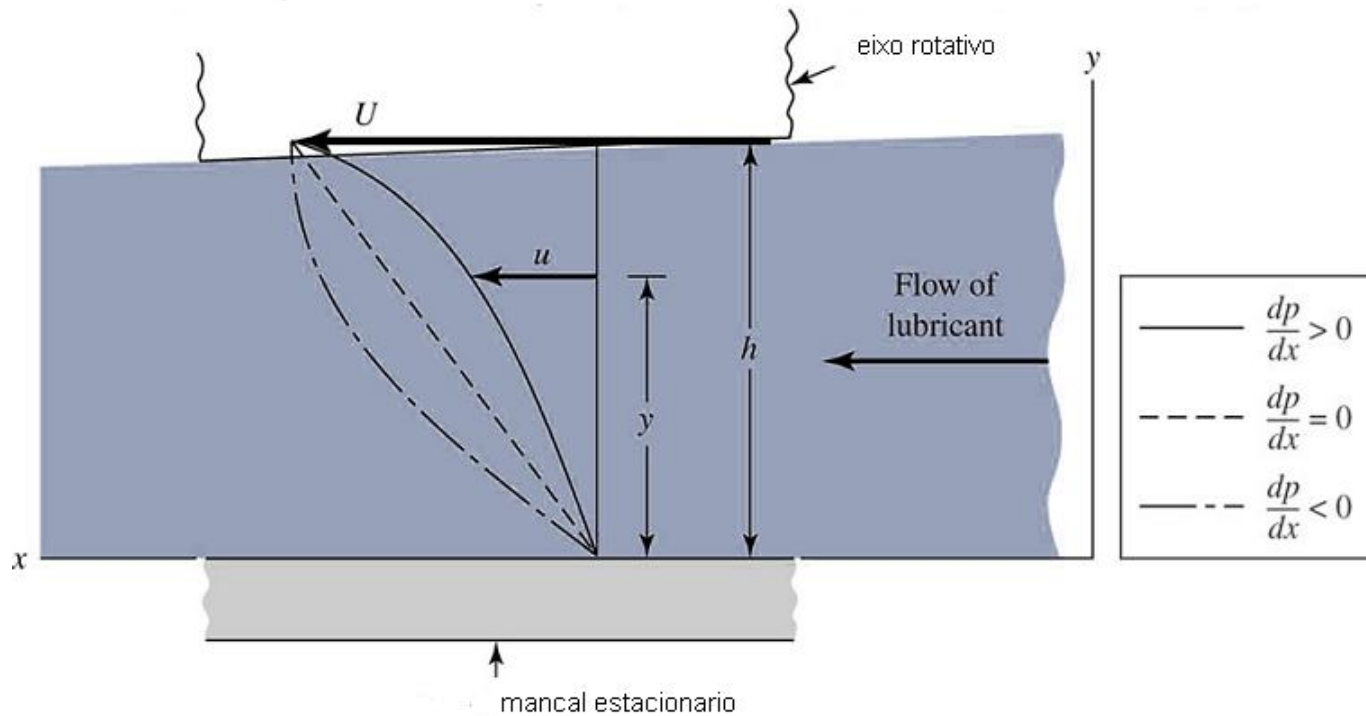
$$y = 0; \quad u = 0$$

$$y = h; \quad u = U$$

$$C_2 = 0$$

$$C_1 = \frac{U}{h} - \frac{h}{2\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y^2 - hy) + \frac{U}{h} y$$

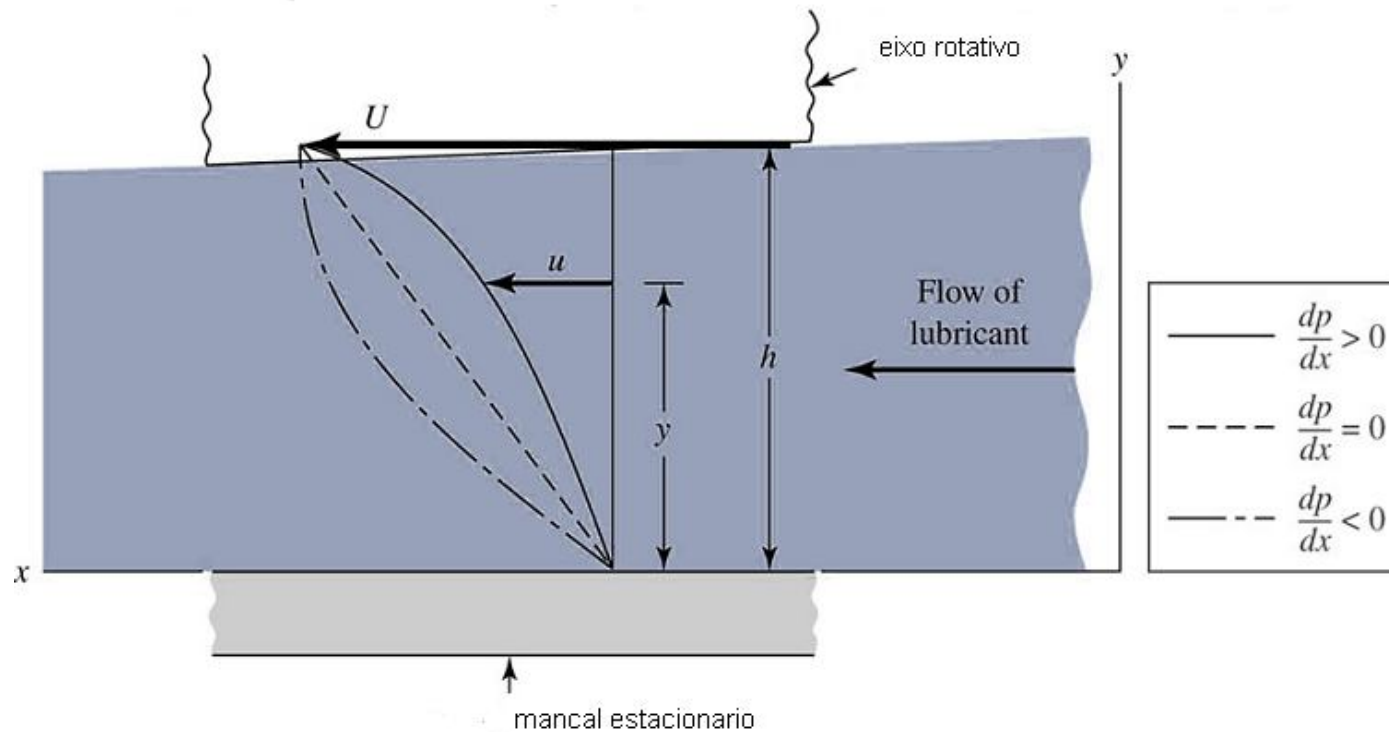


Shigley

TEORIA HIDRODINÂMICA

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y^2 - hy) + \frac{U}{h} y$$

Distribuição de velocidade em função da coordenada y e do gradiente de pressão dp/dx .

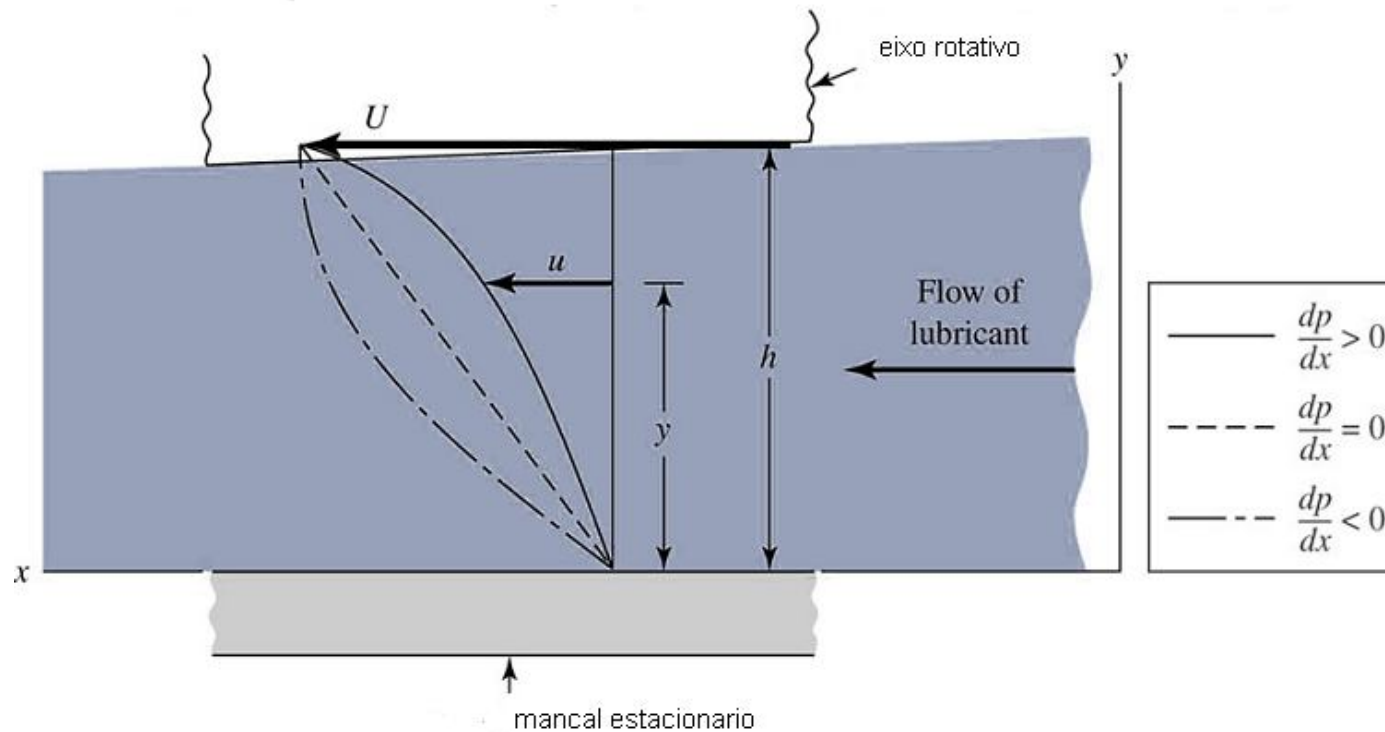


Shigley

TEORIA HIDRODINÂMICA

Quando a pressão é máxima, $dp/dx = 0$, e a velocidade pode ser expressa como:

$$u = \frac{U}{h} y$$



Shigley

TEORIA HIDRODINÂMICA

Volume de lubrificante escoando segundo a direção x , na unidade de tempo (largura unitária em z):

$$Q = \int_0^h u \, dy$$

$$Q = \int_0^h \left(\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y^2 - hy) + \frac{U}{h} y \right) dy$$

$$Q = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left(\frac{y^3}{3} - h \frac{y^2}{2} \right) + \frac{U}{h} \frac{y^2}{2}$$

$$Q = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left(\frac{h^3}{3} - \frac{h^3}{2} \right) + \frac{U}{h} \frac{h^2}{2}$$

$$Q = U \frac{h}{2} - \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \frac{h^3}{12}$$

TEORIA HIDRODINÂMICA

Considerando-se o lubrificante incompressível e que o fluxo é o mesmo para qualquer seção transversal:

$$\frac{dQ}{dx} = 0$$

$$\frac{U}{2} \frac{dh}{dx} - \frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{dp}{dx} \right) = 0$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{dp}{dx} \right) = 6U \frac{dh}{dx}$$

Equação de Reynolds para um escoamento unidimensional, desprezando a fuga lateral (fluxo na direção z).

$$\frac{r}{c} f = \phi \left[\left(\frac{r}{c} \right)^2 \frac{\mu N}{P} \right]$$

Uma das soluções importantes deve-se a Sommerfeld.

FATORES DE PROJETO

Variáveis dadas ou sob controle do projetista:

1. Viscosidade μ ;
2. A carga por unidade de área projetada do mancal, P ;
3. A velocidade angular N ;
4. As dimensões do mancal r , c e l .

Variáveis dependentes (fatores de projeto):

1. Coeficiente de atrito, f ;
2. O aumento de temperatura, ΔT ;
3. O fluxo de óleo, Q ;
4. A espessura mínima da película de óleo, h_0 .

Problema fundamental: definir limites satisfatórios para o segundo grupo de variáveis e então decidir sobre os valores do primeiro.

RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Definição: Número característico do mancal ou número de Sommerfeld:

$$S = \left(\frac{r}{c} \right)^2 \frac{\mu N}{P}$$

S = Número característico do mancal;

r = raio do mancal mm;

c = folga radial, mm;

μ = viscosidade absoluta, Pa.s;

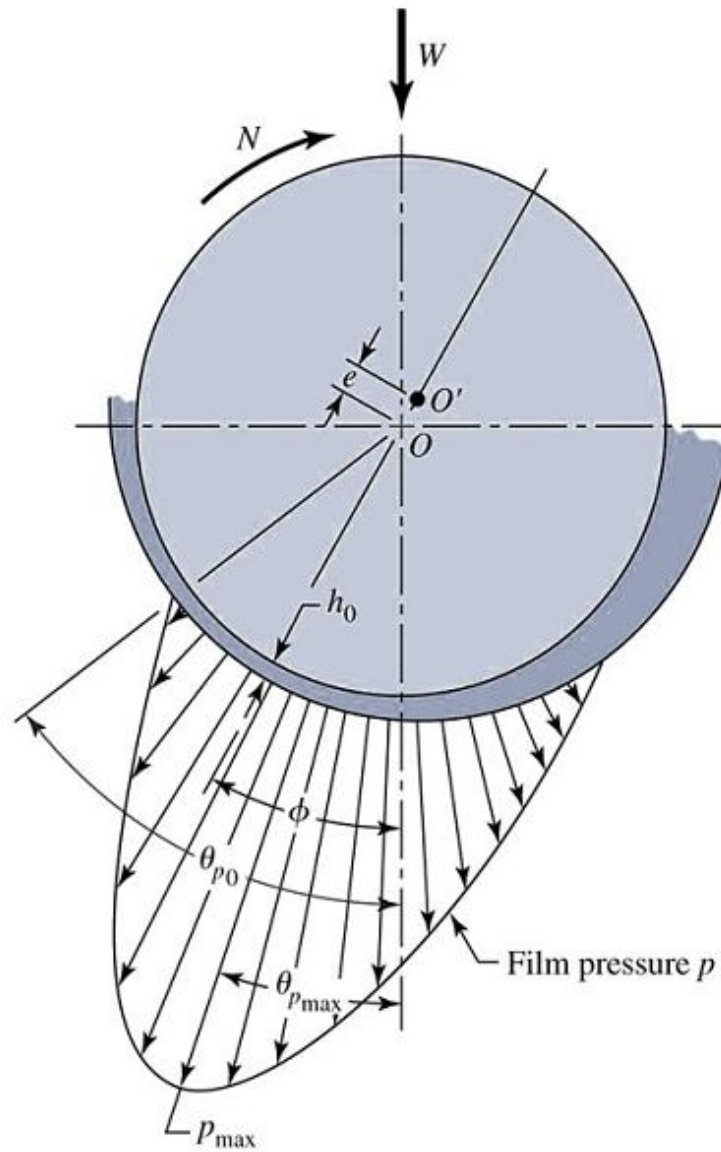
N = velocidade relativa entre a árvore e o mancal, rps;

P = carga por unidade de área projetada, Pa.

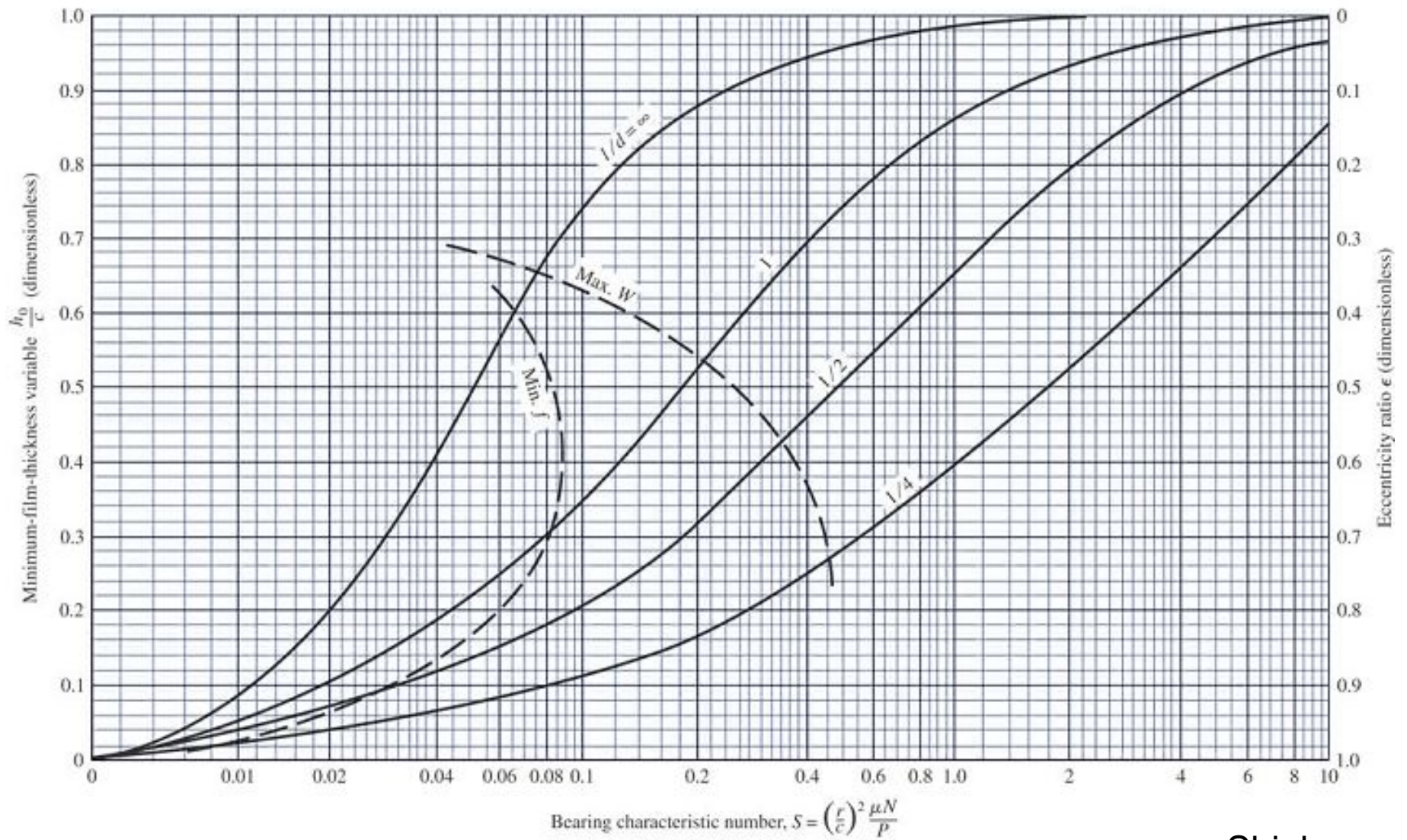
Observação: h_0 é a folga após a aplicação da carga.

O número de Sommerfeld contém as variáveis especificadas pelo projetista, é adimensional e é usado como abscissa nos gráficos.

RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS

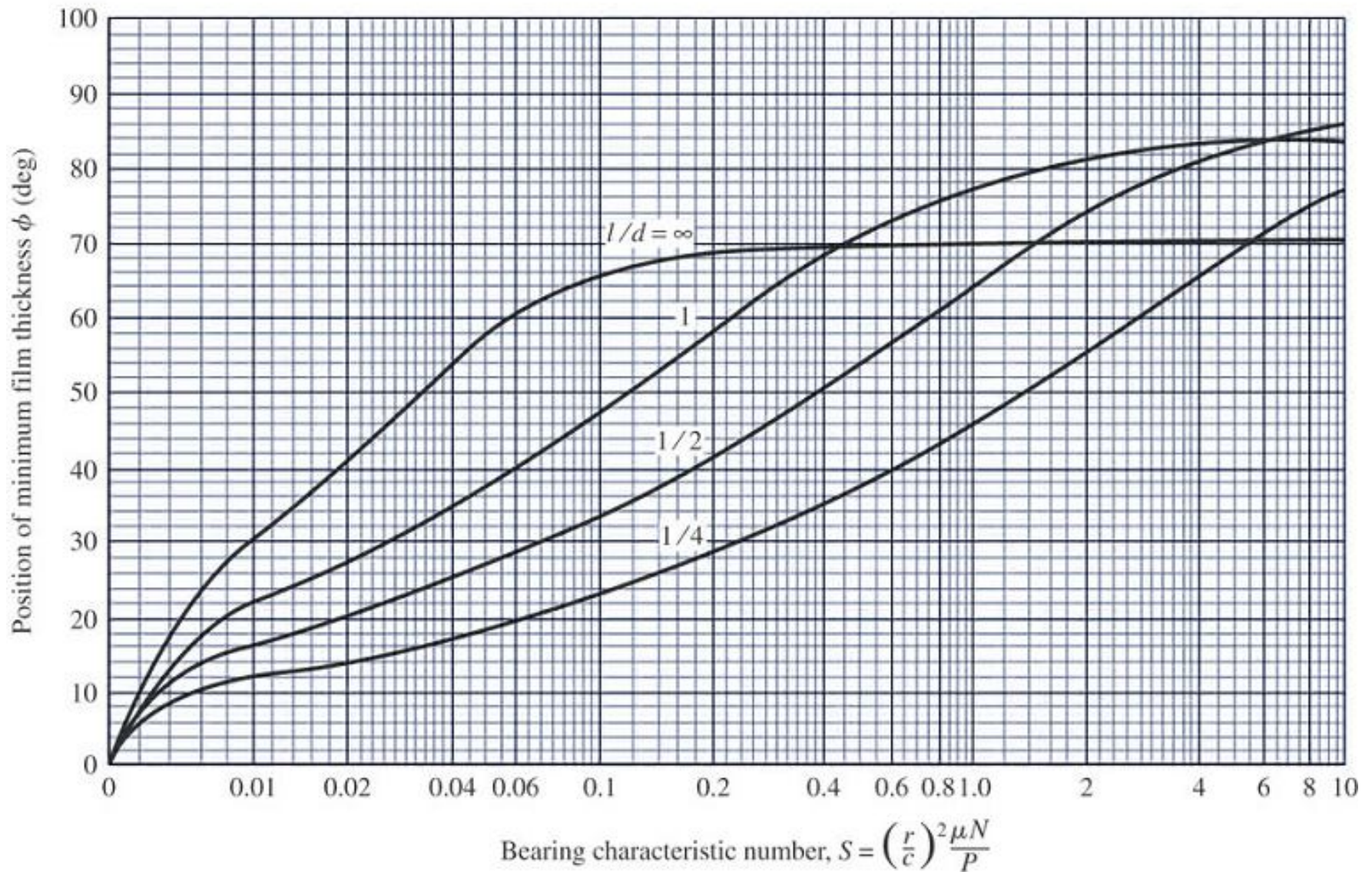


RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS

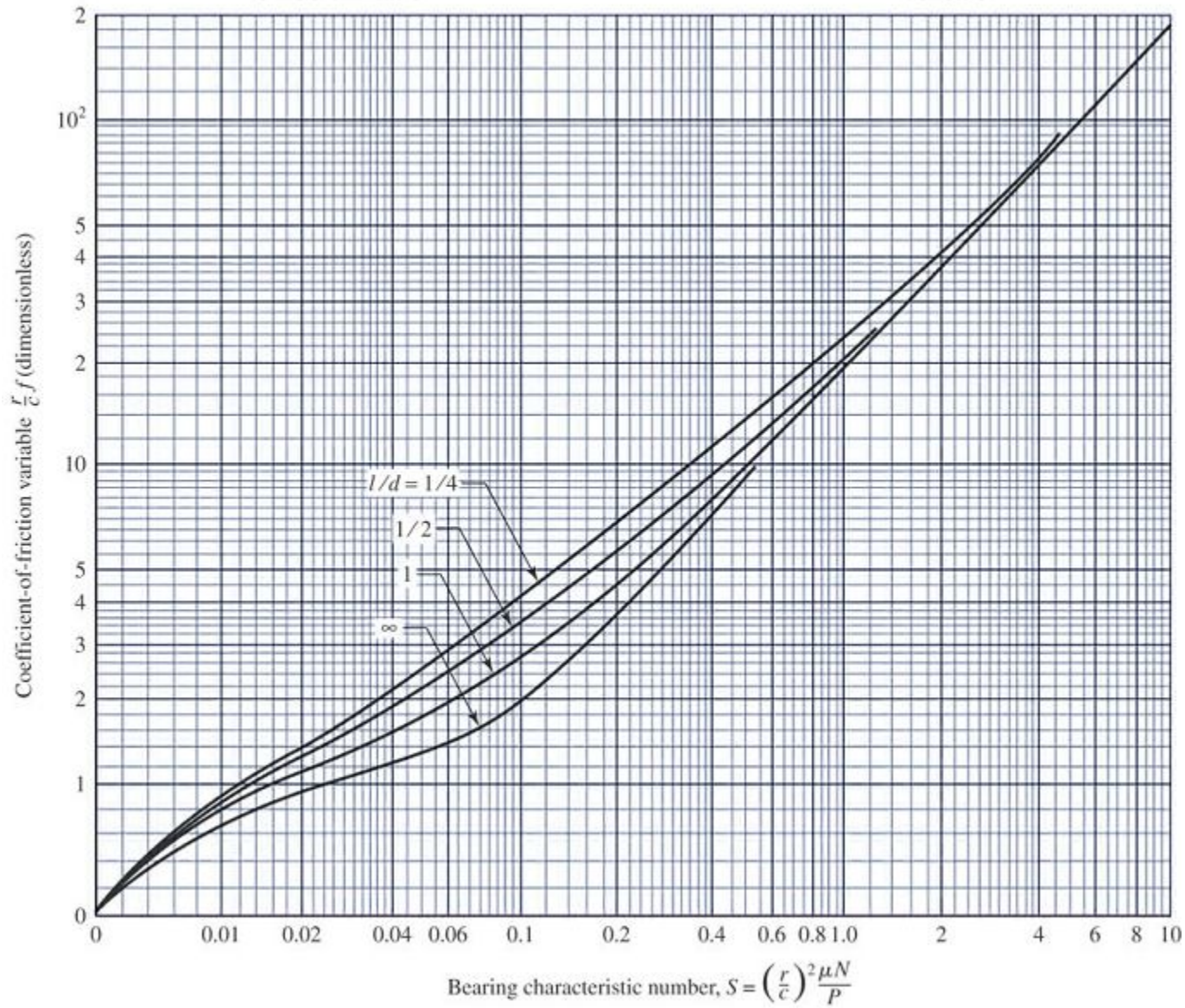


Shigley

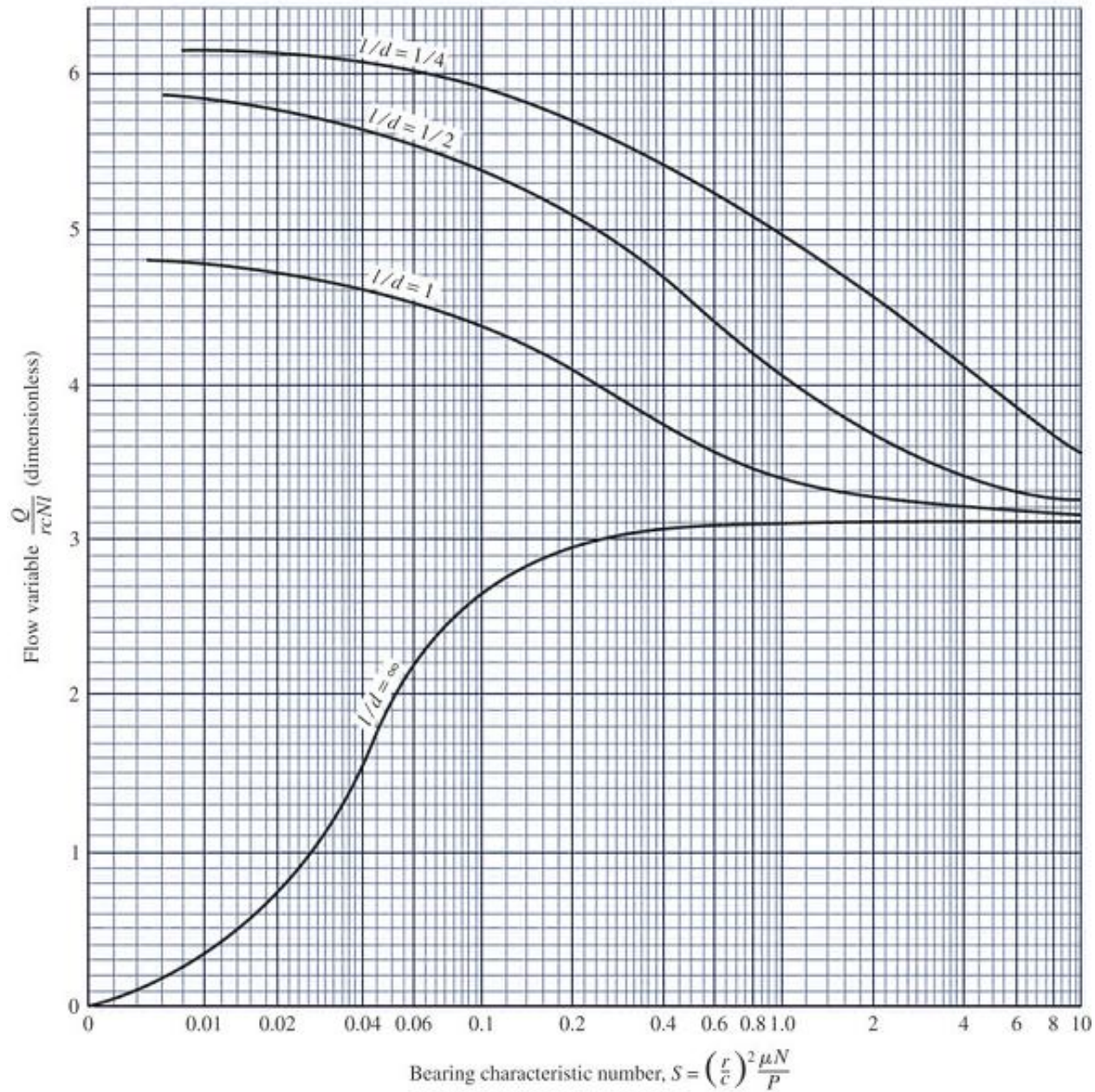
RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS



RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS

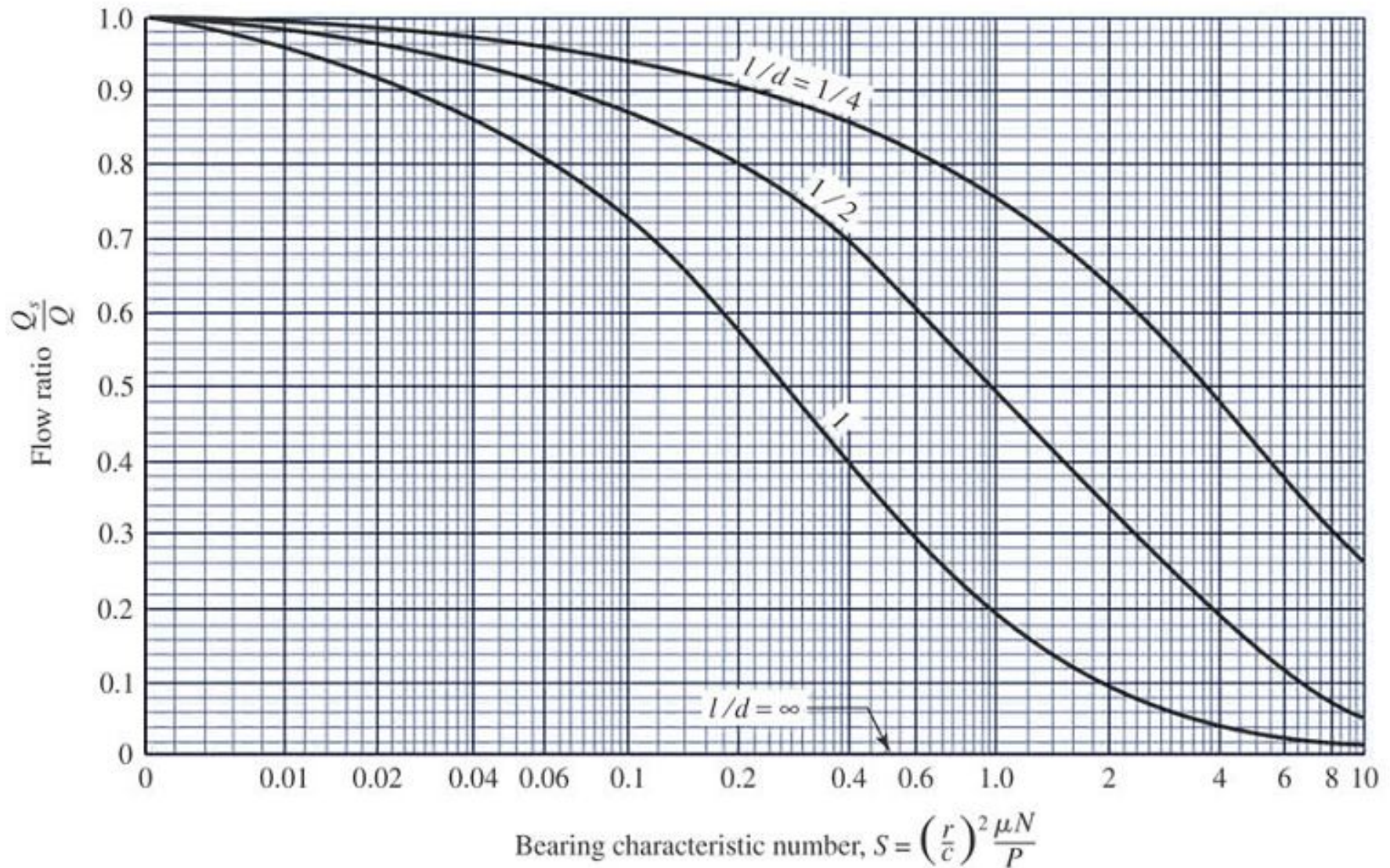


RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS



Shigley

RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS



Fluxo lateral versus fluxo total.

Shigley

EXEMPLO

Os seguintes dados são para um mancal radial:

$$r = 19 \text{ mm};$$

$$c = 0,038 \text{ mm};$$

$$l = 38,1 \text{ mm}$$

$$W = 2224 \text{ N};$$

$$\mu = 0,0276 \text{ Pa}\cdot\text{s};$$

$$N = 30 \text{ rps (1800 rpm)};$$

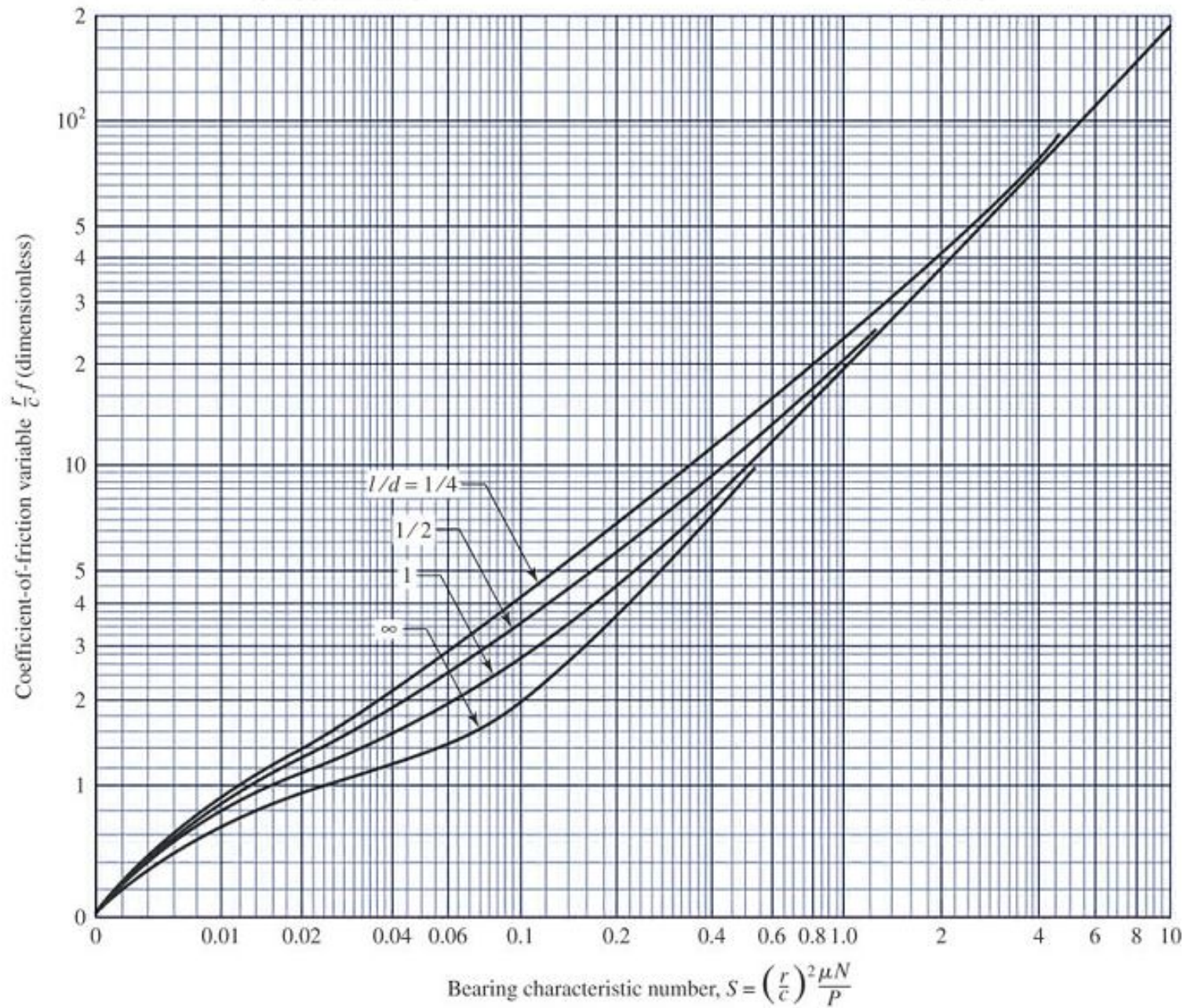
A carga unitária é:

$$P = \frac{W}{2rl} = \frac{2224 \text{ N}}{2 \cdot 0,019 \text{ m} \cdot 0,0381 \text{ m}} = 1,534 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \frac{\mu N}{P} = \left(\frac{19 \text{ mm}}{0,038 \text{ mm}}\right)^2 \frac{0,0276 \cdot 30 \text{ rps}}{1,53 \cdot 10^6 \text{ Pa}} = 0,135$$

$$\frac{l}{d} = \left(\frac{38,1}{2 \cdot 19}\right) = 1,002$$

EXEMPLO



Shigley

EXEMPLO

$$\left(\frac{r}{c}\right) f = 3,3$$

$$f = 3,3 \frac{c}{r} = 3,3 \frac{0,038}{19} = 0,0066$$

Torque devido ao atrito:

$$T = f W r = 0,0066 \cdot 2224N \cdot 0,019m = 0,278Nm$$

Perda de potência no mancal, em Watts :

$$P = T\omega = 0,2788Nm \cdot (2\pi 30) = 55,8W$$

EXEMPLO

Mínima película de óleo. Se for menor do que um certo valor, haverá perigo de contato metal-metal ou pequeno fluxo de óleo, resultando em aumento de temperatura.

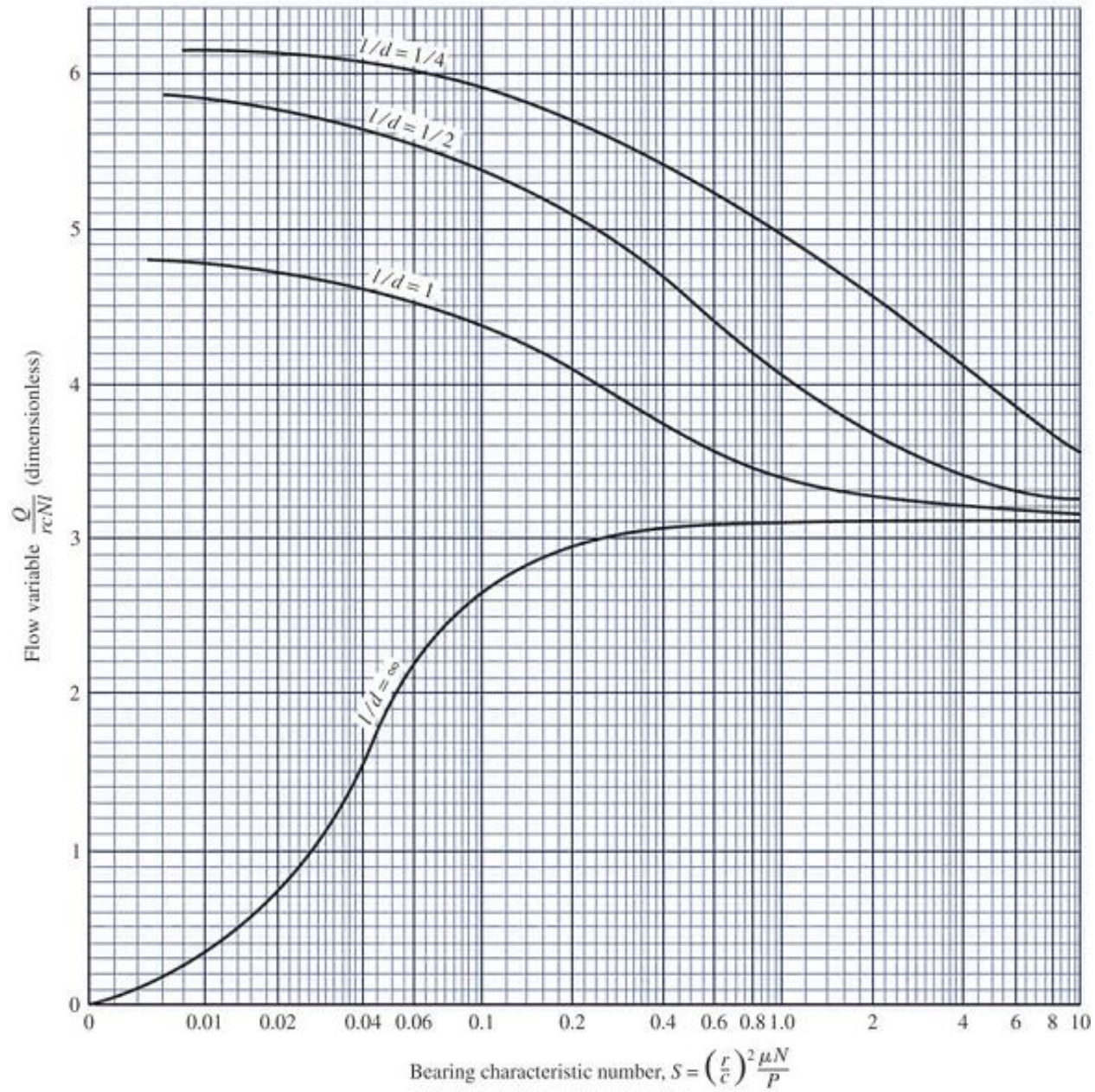
$$\frac{h_0}{c} = 0,4$$

$$h_0 = 0,4c = 0,4 \cdot 0,038 = 0,016mm$$

Variável de fluxo: cálculo da quantidade de lubrificante Q que é bombeada dentro do espaço convergente, pela rotação da árvore.

$$\frac{Q}{rcNl}$$

EXEMPLO



EXEMPLO

$$\frac{Q}{rcNl} = 4,3$$

$$Q = 4,3 rcNl = 4,3(19)(0,038)(30)(38,1)$$

$$Q = 3548 \text{ mm}^3 / \text{s}$$

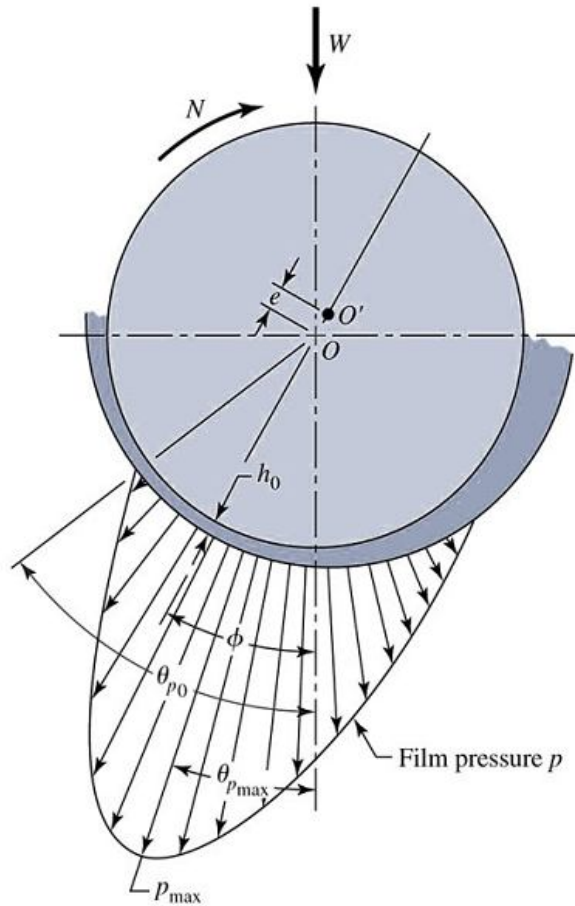
Fuga lateral, quantidade de óleo perdida pelas extremidades.

$$\frac{Q_s}{Q} = 0,68$$

$$Q_s = 0,68(3548) = 2413 \text{ mm}^3 / \text{s}$$

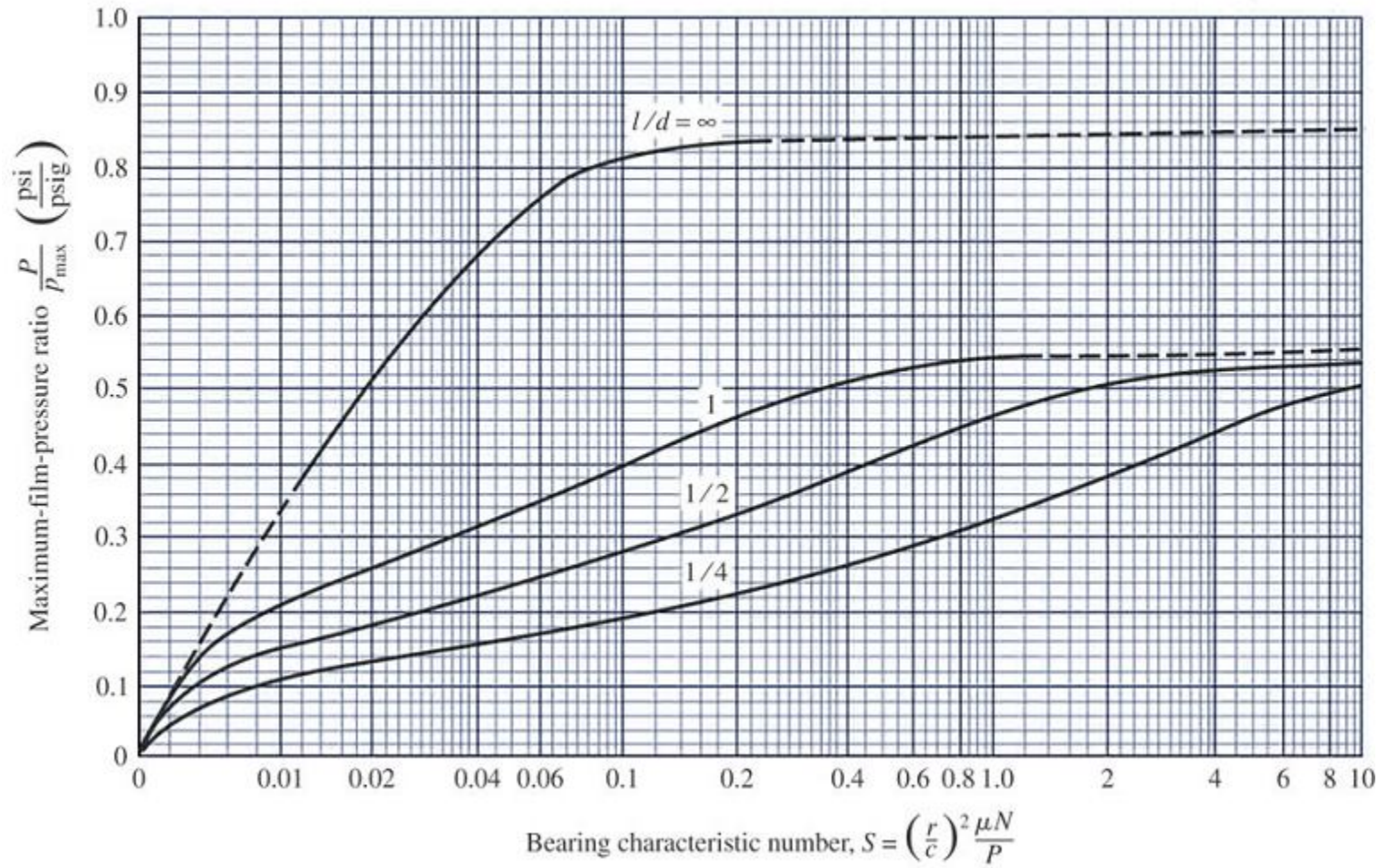
EXEMPLO

Posição da pressão máxima da película:



EXEMPLO

Pressão máxima da película:



$$\frac{P}{P_{\max}} = 0,42$$

EXEMPLO

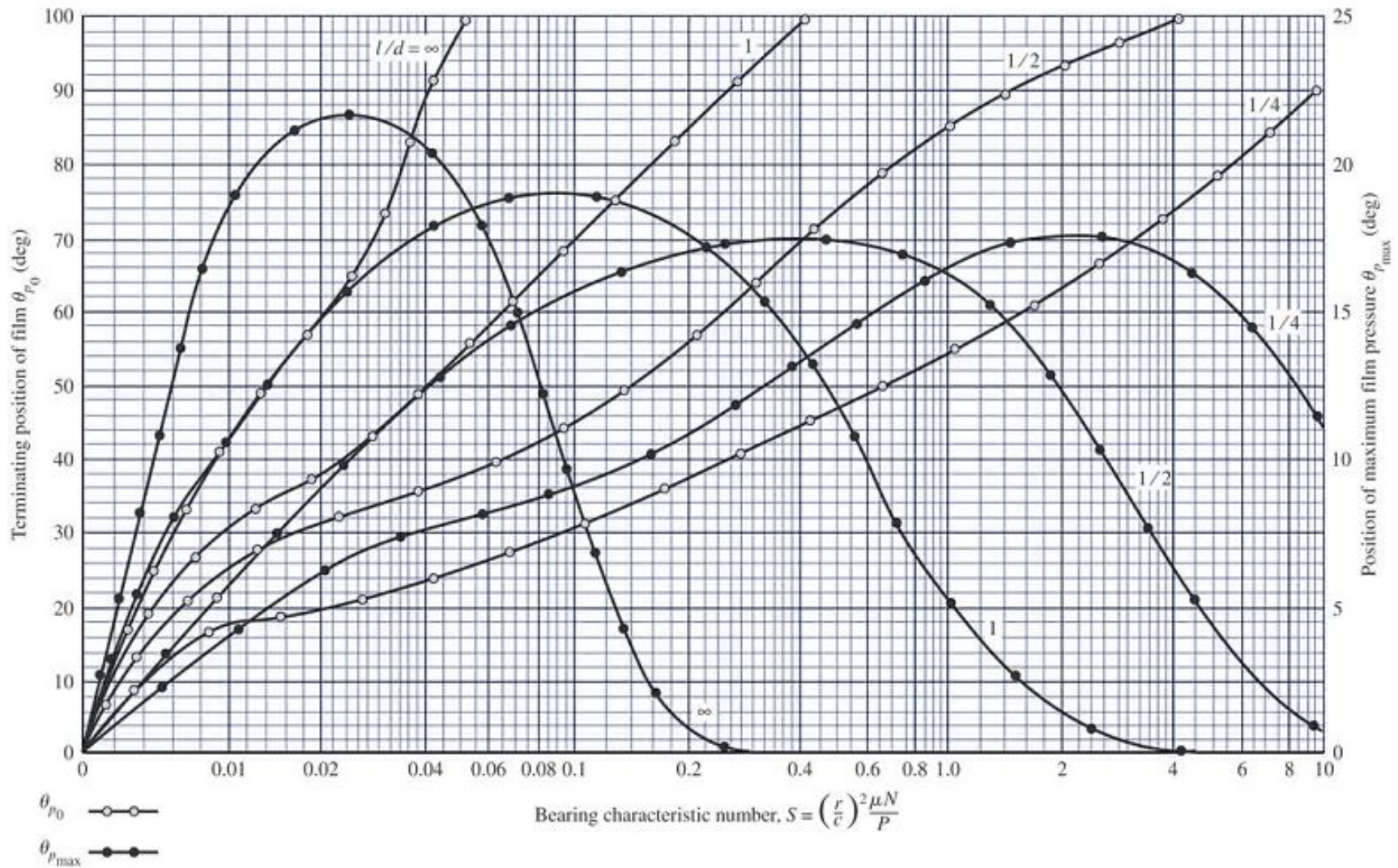
Pressão máxima da película:

$$\frac{P}{P_{\max}} = 0,42$$

$$P_{\max} = 0,42 (1,53) = 3,643 \text{ MPa}$$

EXEMPLO

Posição da pressão máxima da película (útil no posicionamento de ranhuras de lubrificação):



EXEMPLO

Posição da pressão máxima da película:

$$\theta_{P_{\max}} = 18,5^\circ$$

$$\theta_{P_0} = 75^\circ$$

EXERCÍCIO 12-6

Um mancal completo de munhão tem um diâmetro de munhão de eixo de 25 mm com uma tolerância unilateral de $-0,01$ mm. O orifício da bucha tem um diâmetro de 25,04 mm com uma tolerância unilateral de 0,03 mm. A razão l/d é unitária. A carga de bucha é de 1,25 kN, e o munhão roda a 1200 rpm. Analise a montagem de folga mínima se a viscosidade média é de 50 mPa.s. Para encontrar a espessura mínima de óleo, a perda de potência e a percentagem de fluxo lateral.

$$c_{\min} = \frac{d_{\text{bucha}_{\min}} - d_{\text{eixo}_{\max}}}{2} = \frac{25,04 - 25}{2} = 0,02 \text{ mm}$$

$$r = \frac{25 \text{ mm}}{2} = 12,5 \text{ mm}$$

$$\frac{r}{c} = \frac{12,5 \text{ mm}}{0,02 \text{ mm}} = 625$$

$$N = 1200 \text{ rpm} = \frac{1200}{60} \text{ rev/s} = 20 \text{ rev/s}$$

EXERCÍCIO 12-6

$$P = \frac{W}{2rl} = \frac{1250}{2(12,5\text{mm})25\text{mm}} = 2\text{MPa}$$

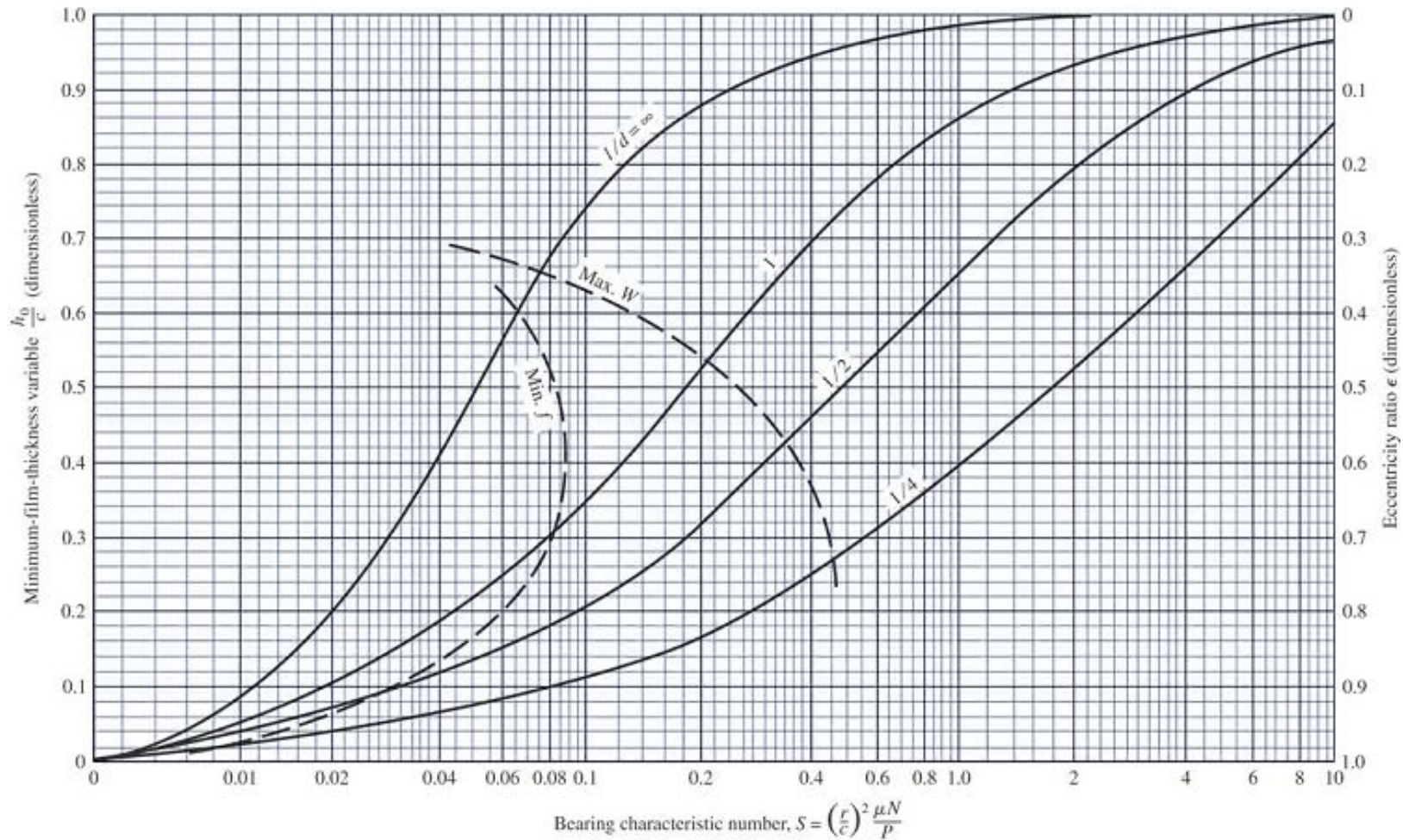
Número característico do mancal ou número de Sommerfeld:

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \frac{\mu N}{P}$$

$$S = (625)^2 \frac{50 \cdot 10^{-3} (20)}{2 \cdot 10^6 \text{Pa}} = 0,1953$$

EXERCÍCIO 12-6

Da Figura 12-16:

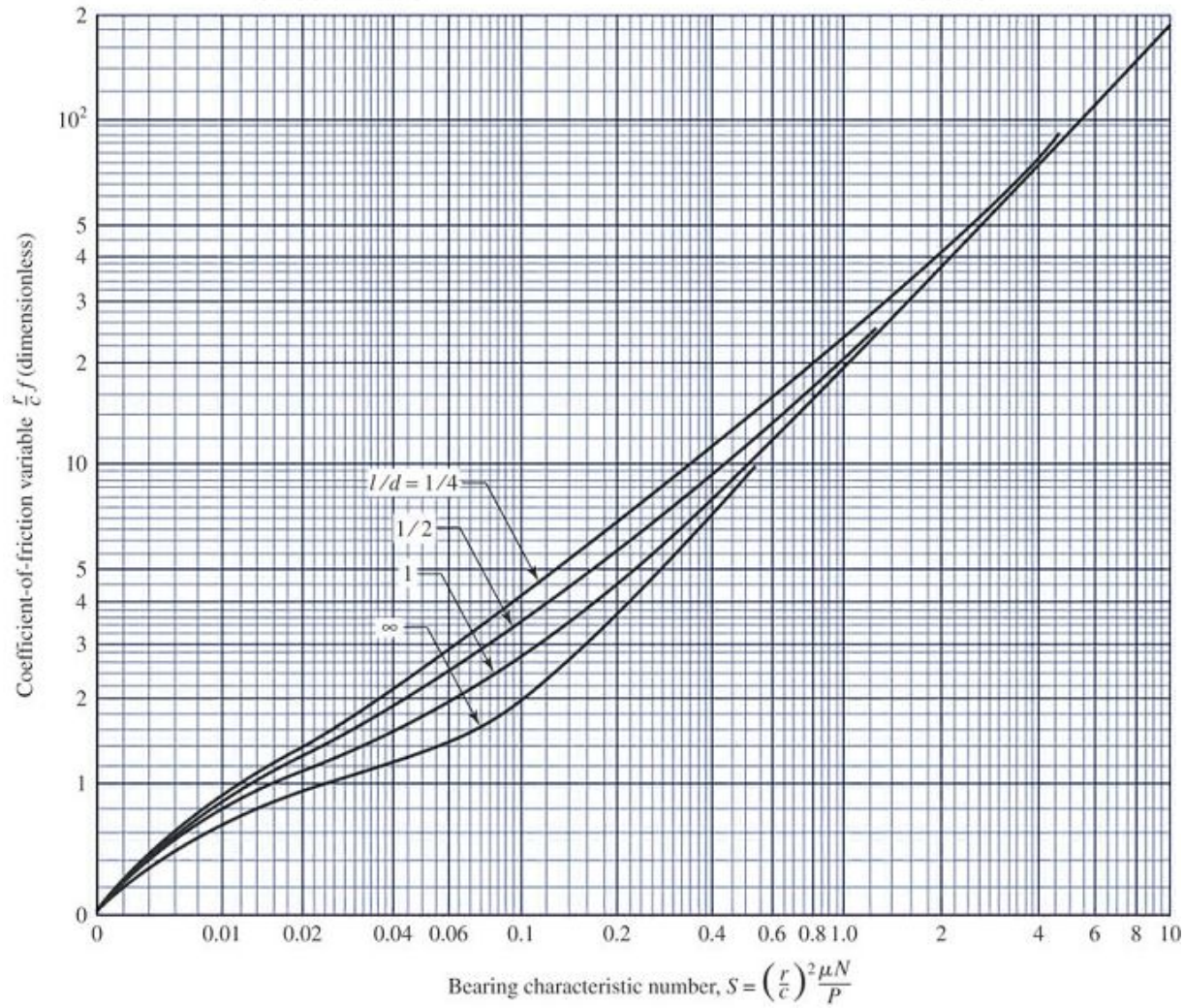


$$\frac{h_0}{c} = 0,5$$

$$h_0 = 0,5 c = 0,5(0,02mm) = 0,01mm$$

EXERCÍCIO 12-6

Da Figura 12-18:



$$\frac{r}{c} f = 4,5$$

$$(625) f = 4,5$$

$$f = 0,0072$$

EXERCÍCIO 12-6

Da Figura 12-18:

$$T = f W r = 0,0072(1250N)0,0125m = 0,1125 Nm$$

$$T = 0,0072(1250N)0,0125m$$

$$T = 0,1125 Nm$$

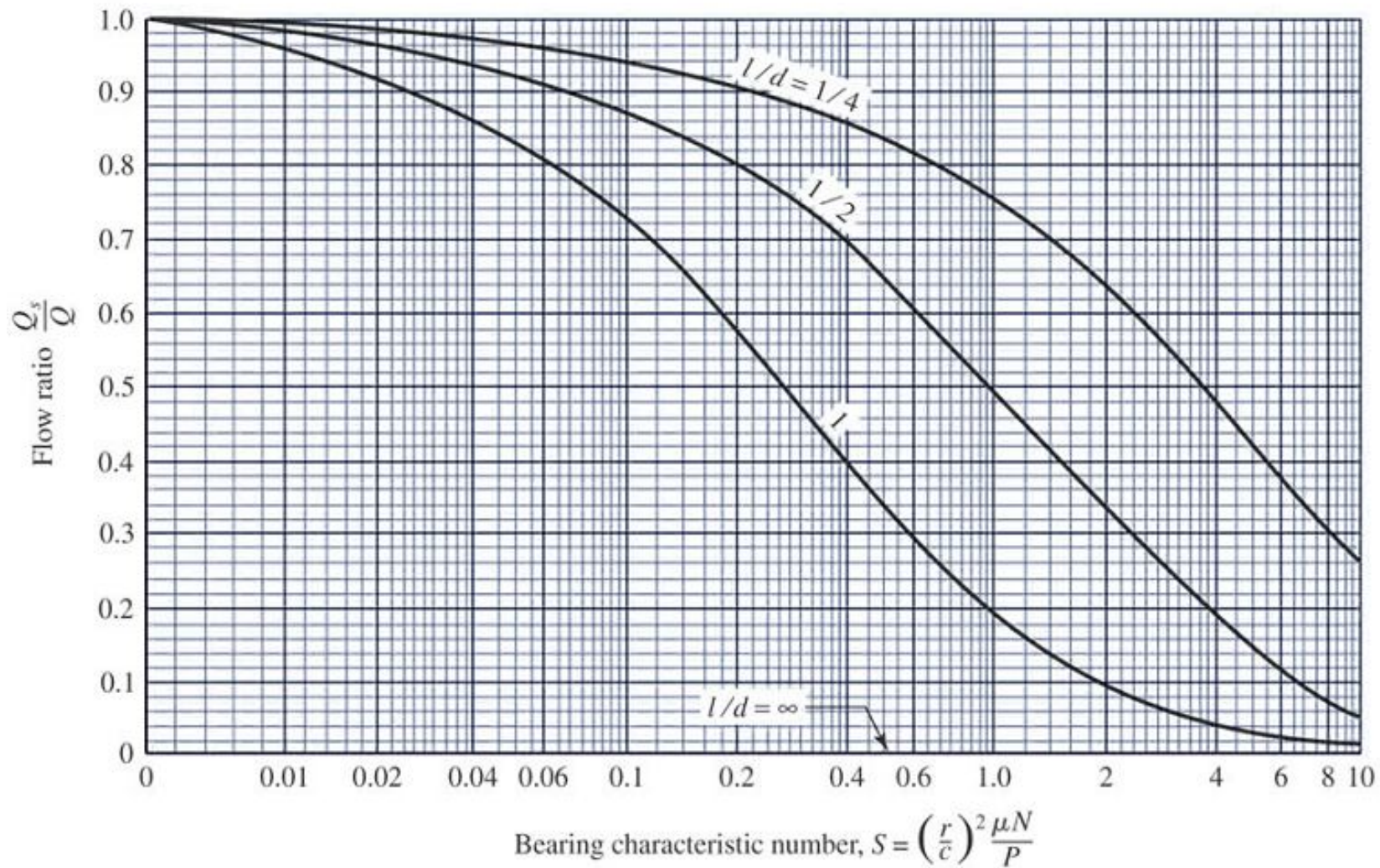
$$H = 2 \pi N T$$

$$H = 2 \pi (20)0,1125$$

$$H = 14,13W$$

Da Figura 12-20:

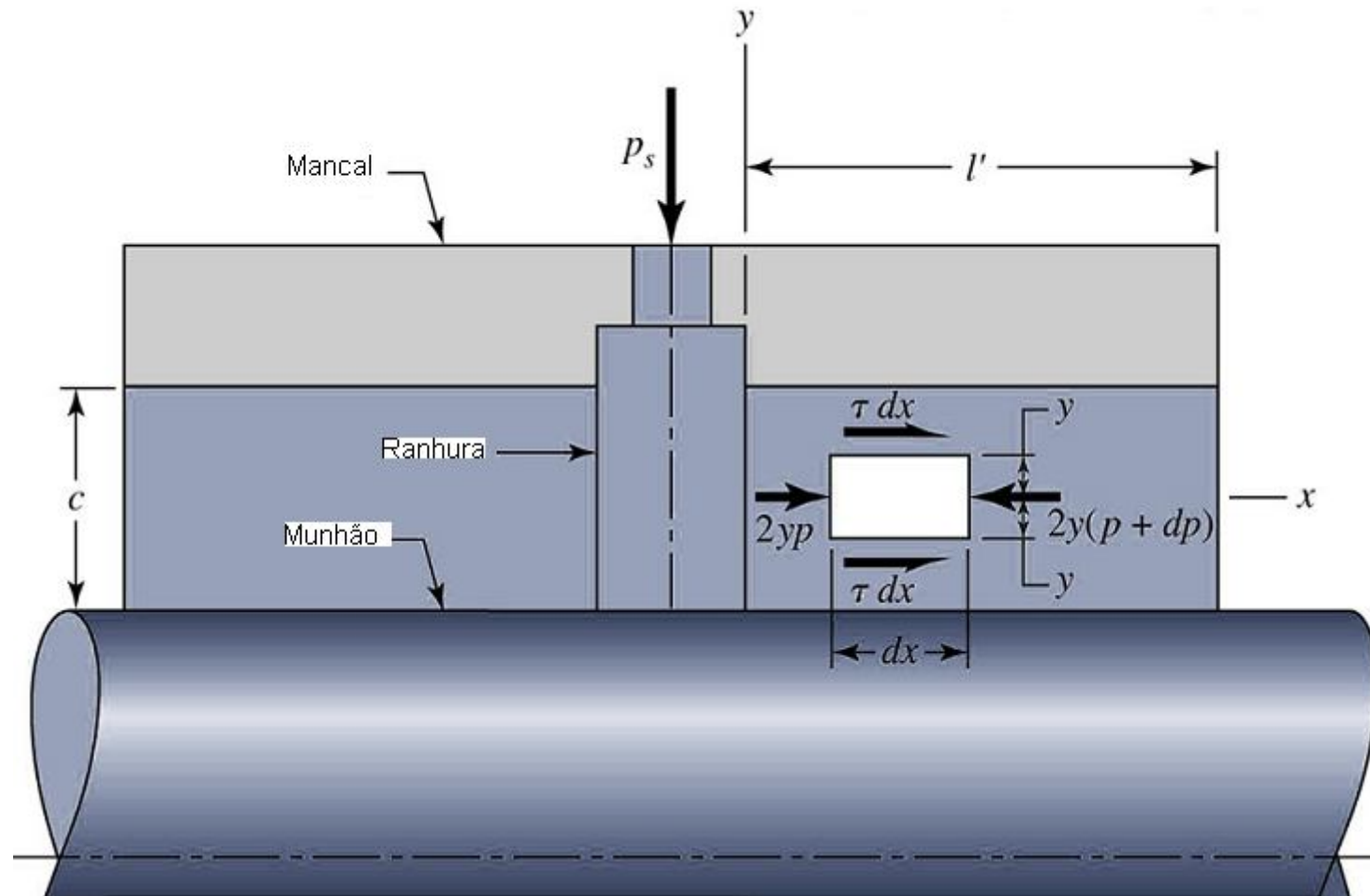
EXERCÍCIO 12-6



$$\frac{Q_s}{Q} = 0,6$$

60% de fluxo lateral

MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

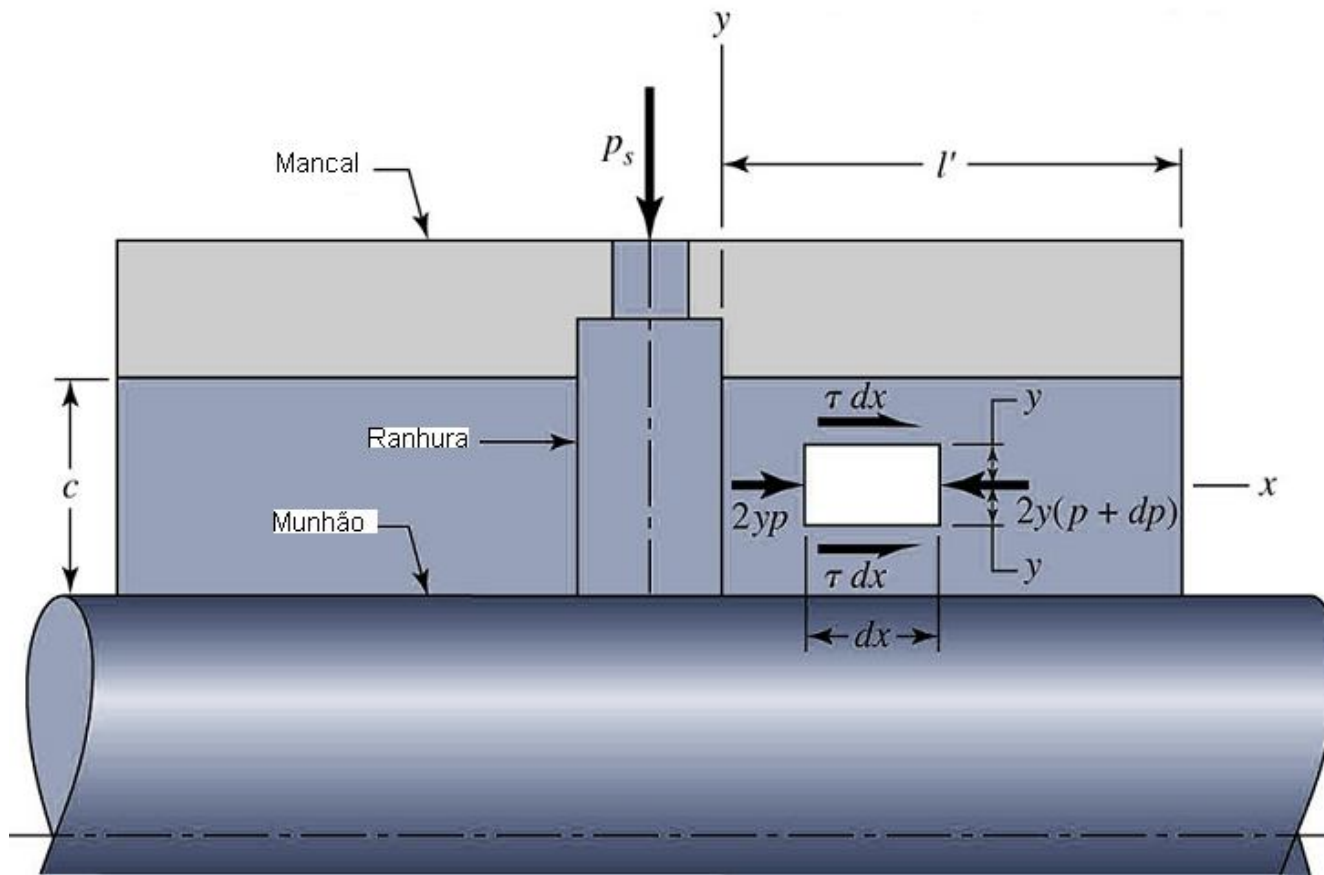


MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

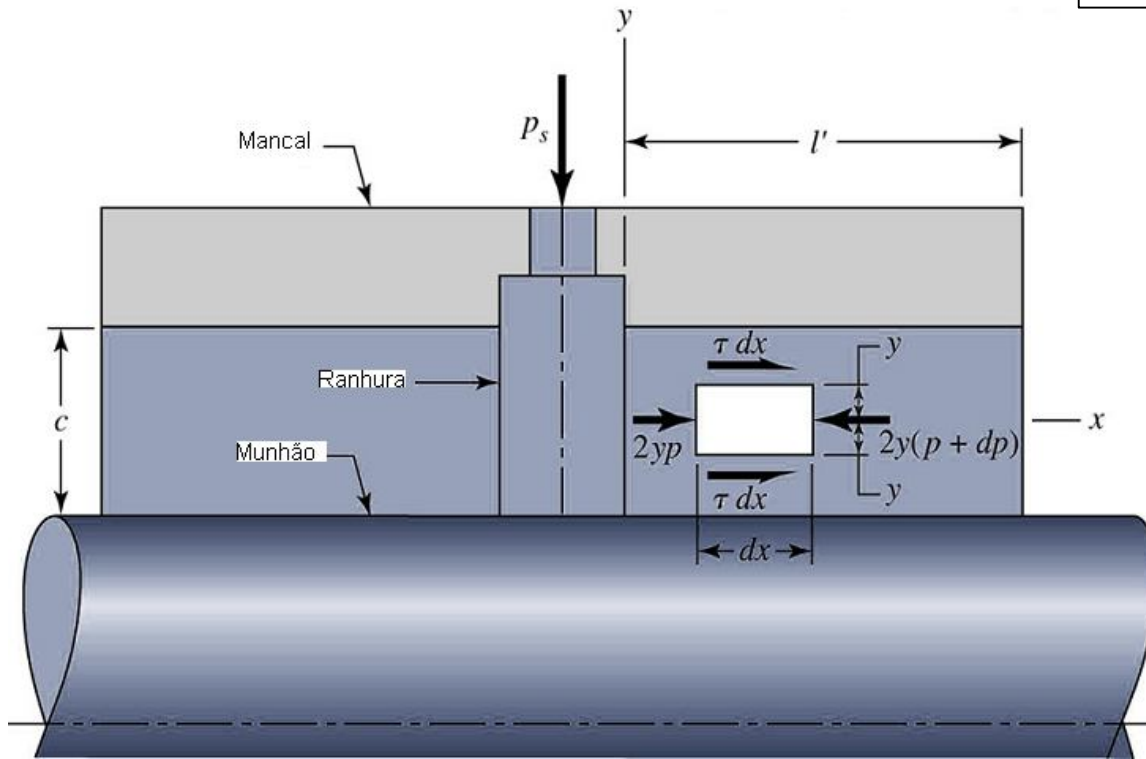
- Utilizado quando a ação hidrodinâmica gera muito calor e o fluxo normal do lubrificante é insuficiente para retirá-lo;
- Fluxo máximo obtido com ranhura circunferencial no centro do mancal, com um furo de admissão localizado no lado oposto à zona carregada do mancal;
- Ranhura ampla para que a queda de pressão na própria ranhura seja bastante pequena;
- Fluxo de óleo é a quantidade que flui para fora das duas partes (metades) do mancal.
- Ignorando-se a rotação do eixo, o fluxo de lubrificante será causado pela pressão de suprimento p_s .

MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

- Pressão de alimentação é p_s , pressão em um ponto qualquer é P e considerando-se o fluxo laminar, pode-se analisar o equilíbrio estático de um elemento de largura dx , espessura $2y$ e altura unitária



MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO



$$2y(p + dp) - 2yp - 2\tau dx = 0$$

$$\tau = y \frac{dp}{dx}$$

•Mas, da lei de Newton para fluidos viscosos:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} y$$

MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} y$$

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + C_1$$

$$y = \pm \frac{c}{2} \Rightarrow u = 0$$

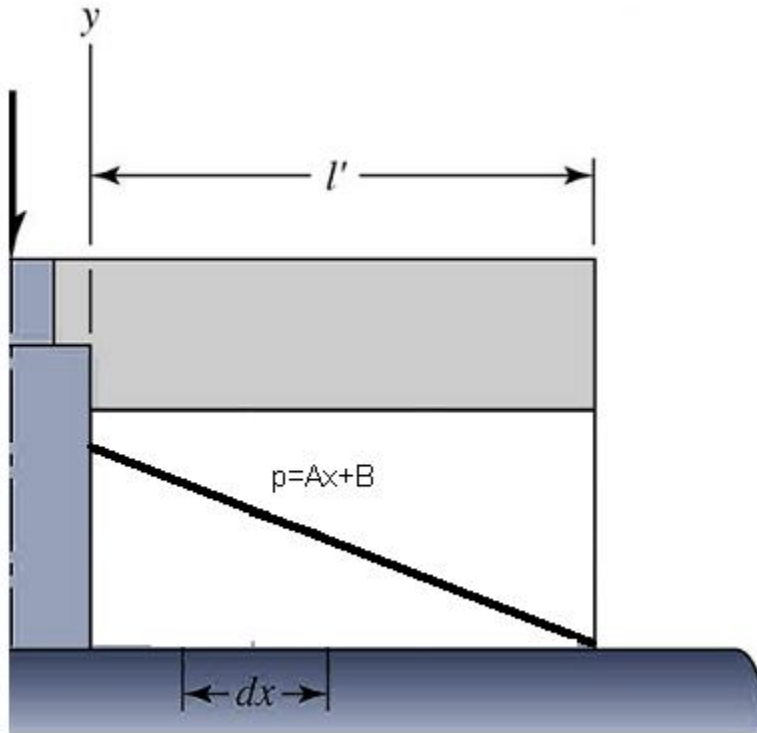
$$0 = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left(\frac{c}{2}\right)^2 + C_1$$

$$C_1 = -\frac{c^2}{8\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$u = \frac{1}{8\mu} \frac{dp}{dx} (4y^2 - c^2)$$

MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

Assumindo-se que a pressão de óleo varia linearmente:



$$p = Ax + B$$

$$p = p_s \text{ em } x = 0$$

$$p = 0 \text{ em } x = l'$$

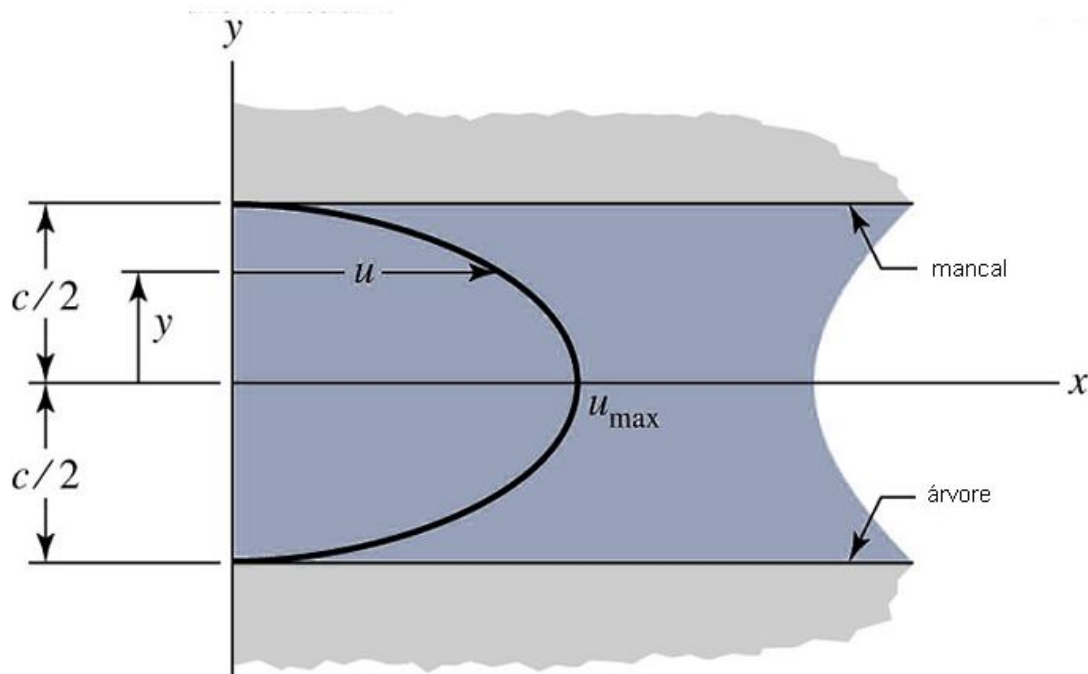
$$A = -\frac{p_s}{l'} \quad B = p_s$$

$$p = -\frac{p_s}{l'} x + p_s$$

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{p_s}{l'}$$

$$u = \frac{p_s}{8\mu l'} (c^2 - 4y^2)$$

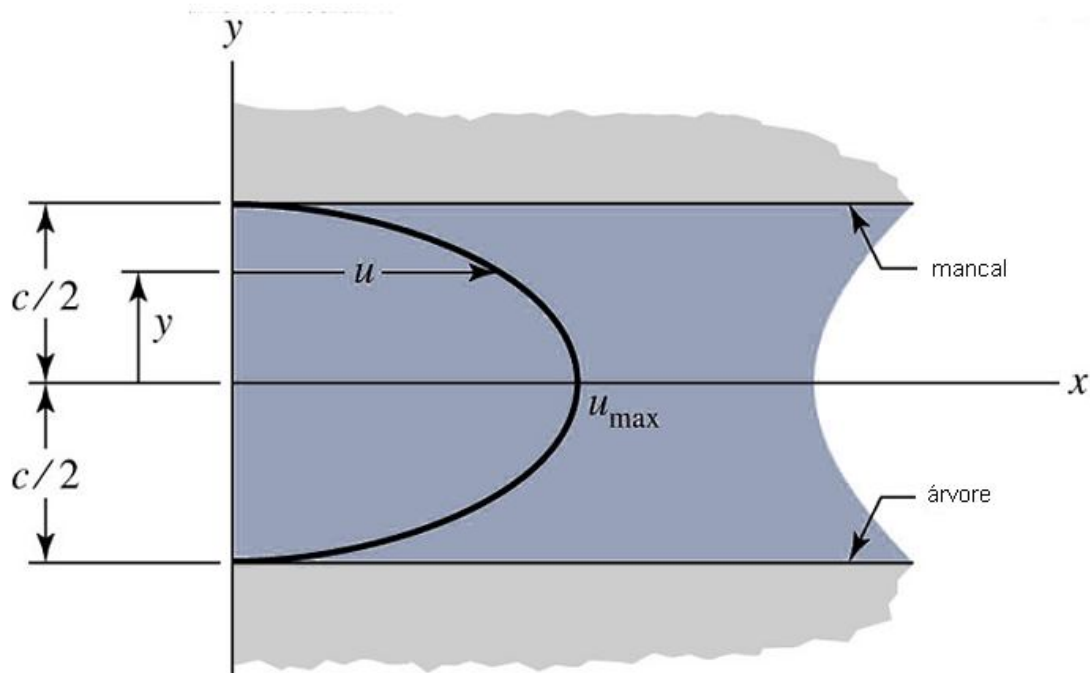
MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO



$$u = \frac{p_s}{8\mu l'} (c^2 - 4y^2)$$

$$u_{\max} = \frac{p_s c^2}{8\mu l'} \quad , \text{ para } y = 0$$

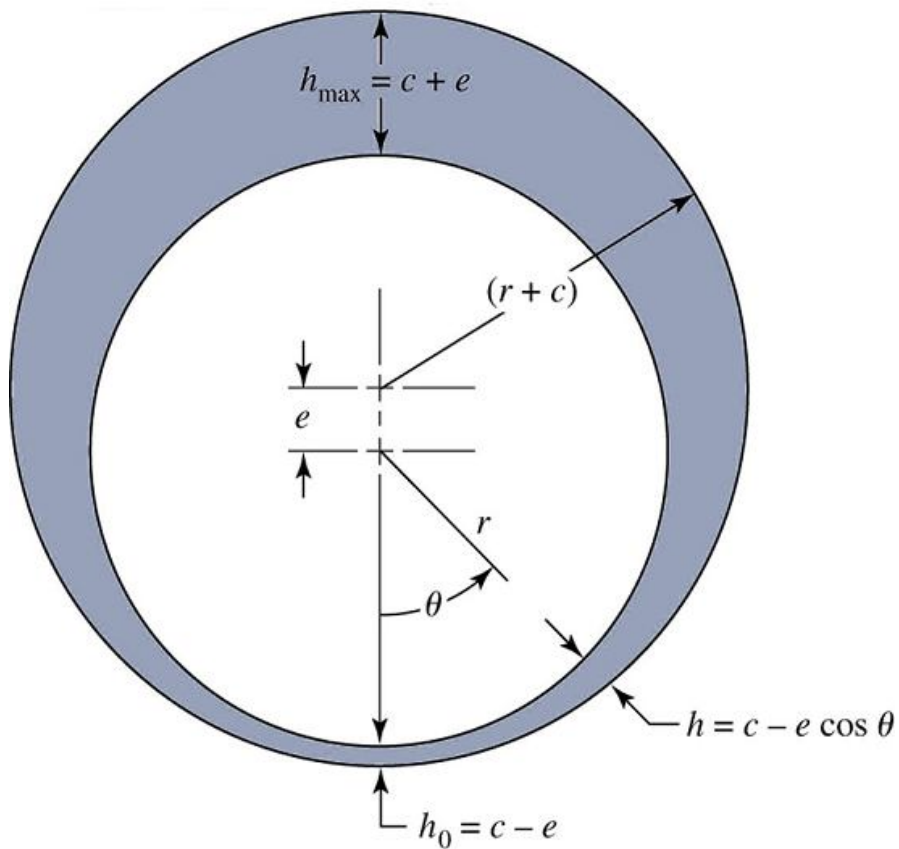
MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO



$$u_m = \frac{2}{3} \frac{p_s c^2}{8\mu l'} = \frac{p_s c^2}{12\mu l'}$$

MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

- para mancais concêntricos:



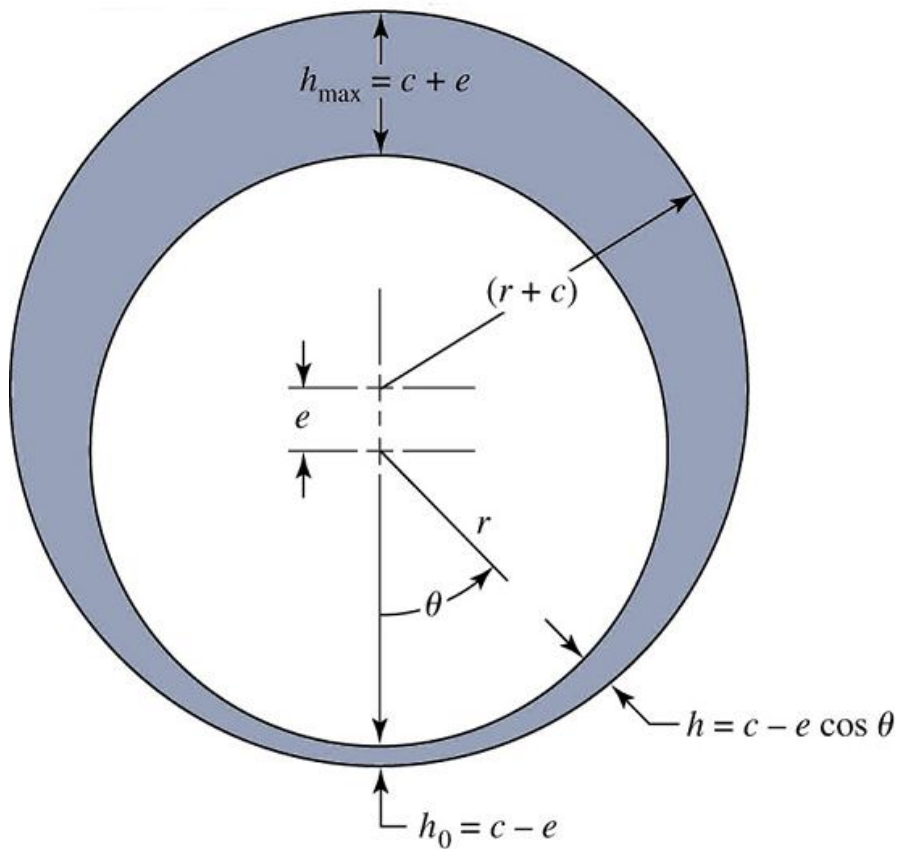
$$A = 2\pi r c$$

$$Q_s = 2u_m A = 2 \frac{p_s c^2}{12\mu l'} \cdot 2\pi r c$$

$$Q_s = \frac{\pi p_s c^3 r}{3\mu l'}$$

MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

- para mancais excêntricos, tem-se as seguintes relações:



$$h_0 = c(1 - \varepsilon)$$

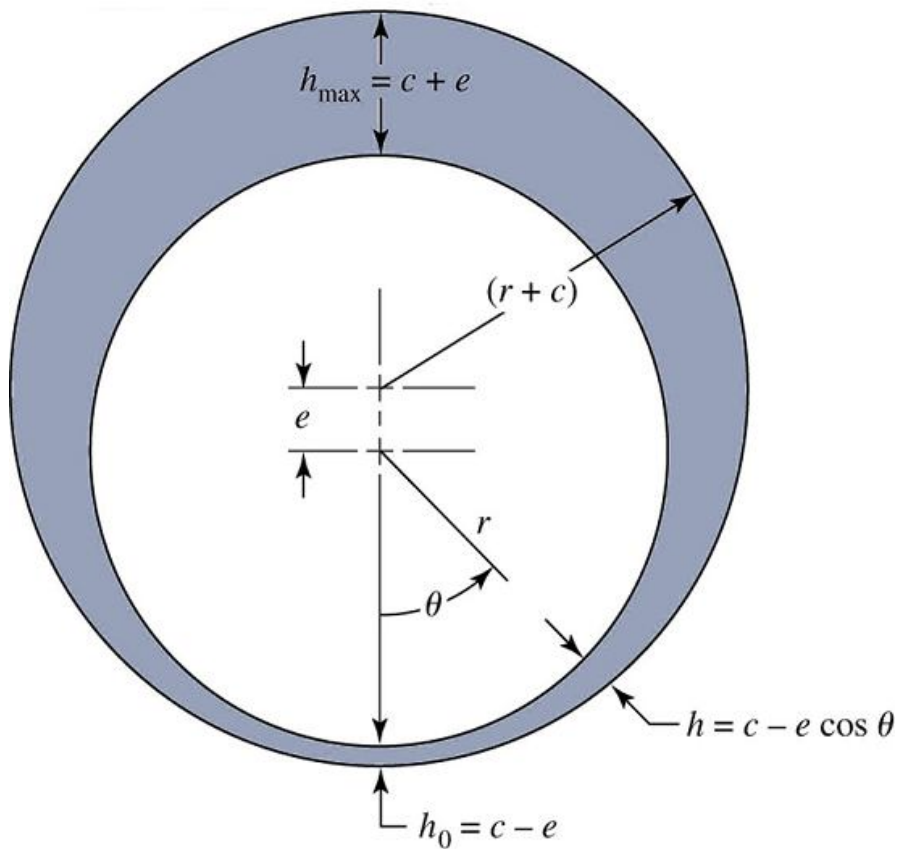
$$\varepsilon = \frac{e}{c}$$

$$h_{\max} = c + e = c(\varepsilon + 1)$$

$$\frac{h_0^3 + h_{\max}^3}{2} = c^3(1 + 3\varepsilon^2)$$

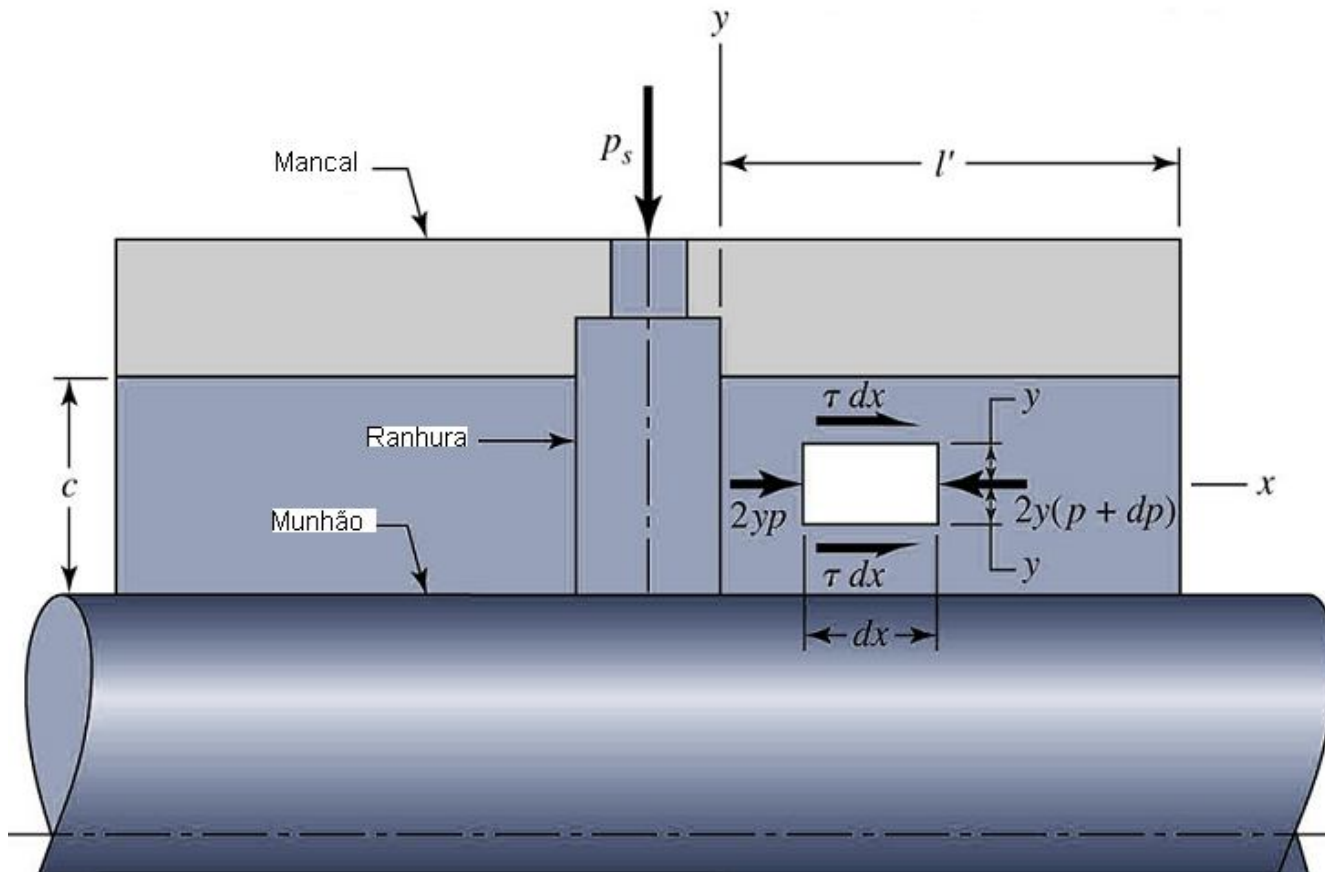
MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

- fator de correção necessário para modificação de Q_s : $(1 + 3\varepsilon^2)$
- Dennison $(1 + 1,5\varepsilon^2)$



$$Q_s = (1 + 1,5\varepsilon^2) \frac{\pi p_s c^3 r}{3\mu l'}$$

MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO



$$P = \frac{W / 2}{2r l'} = \frac{W}{4r l'}$$

MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

$$\Delta T_c = \frac{H}{\gamma C Q_s}$$

- ΔT_c , Acréscimo de temperatura em °C.
- H: Calor dissipado, Joule por hora;
- C: Coeficiente combinado de radiação e convecção;
- γ , peso por unidade de volume do lubrificante:

$$\begin{aligned}\gamma &= 8440 \text{ N} / \text{m}^3, \\ C &= 428 \text{ cal} / \text{kgf}^\circ \text{C}, \\ J &= 4,19 \text{ J} / \text{cal}\end{aligned}$$

$$H = \frac{2\pi f W r N}{J}$$

$$\Delta T_c = \frac{6\mu l' f W N}{(1 + 1,5\varepsilon^2) J \gamma C p_s c^3}$$

MANCAIS ALIMENTADOS SOB PRESSÃO

$$\Delta T_c = \frac{978 \cdot 10^6 [(r/c)f] SW^2}{(1 + 1,5\varepsilon^2) p_s r^4}$$

SI

$$\Delta T_c = \frac{0,0123 [(r/c)f] SW^2}{(1 + 1,5\varepsilon^2) p_s r^4}$$

Sistema Inglês

EXERCÍCIO 12-11

Um mancal completo de munhão tem um diâmetro de eixo de 80,00 mm com uma tolerância unilateral de $-0,01$ mm. A razão l/d é unitária. A bucha tem um diâmetro de orifício de 80,08 mm com uma tolerância unilateral de $+0,03$ mm. O suprimento de óleo SAE 30 está em um reservatório de sulco axial com uma temperatura de regime estável de 60° C. A carga radial é de 3000 N. Estime a temperatura média de filme, a espessura mínima de filme, a taxa de perda de calor e a taxa de fluxo lateral de lubrificante para a montagem de folga mínima, se a velocidade do munhão é de 8 rps..

$$c_{\min} = \frac{d_{\text{bucha}_{\min}} - d_{\text{eixo}_{\max}}}{2} = \frac{80,08 - 80,00}{2} = 0,04 \text{ mm}$$

$$r = \frac{d}{2} = \frac{80 \text{ mm}}{2} = 40,0 \text{ mm}$$

$$\frac{r}{c} = \frac{40,0 \text{ mm}}{0,04 \text{ mm}} = 1000$$

$$P = \frac{W}{2rl} = \frac{3000}{2(40,0 \text{ mm})80 \text{ mm}} = 0,46875 \text{ MPa}$$

EXERCÍCIO 12-11

1ª tentativa(temperatura média):

$$T_f = 70^{\circ}C$$

$$\mu = 18\text{ mPa}\cdot\text{s}$$

$$\Delta T = 2(70^{\circ}C - 60^{\circ}C) = 20^{\circ}C$$

$$T_{med} = T_1 + \frac{\Delta T}{2}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \frac{\mu N}{P}$$

$$S = (1000)^2 \frac{(18 \cdot 10^{-3})8}{0,46875 \cdot 10^6} = 0,3072$$

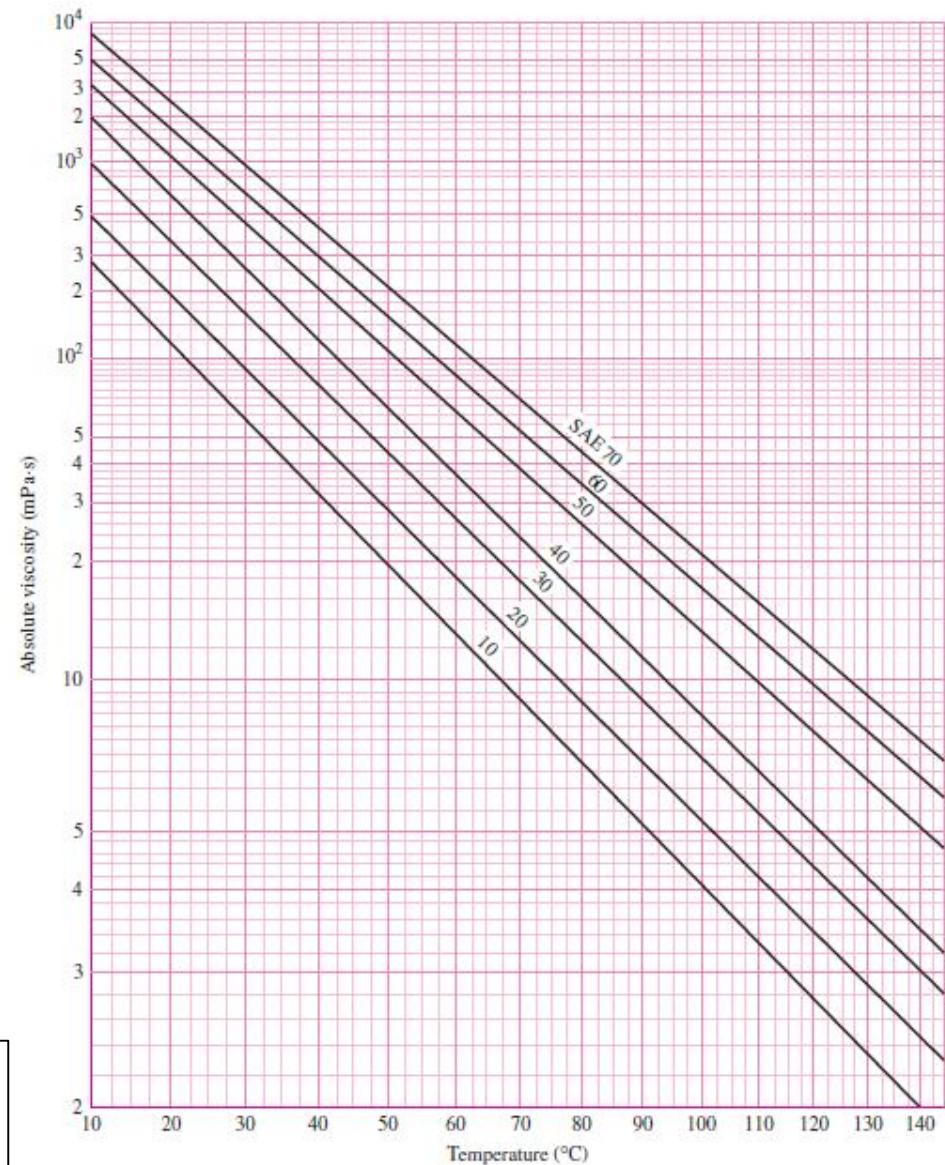


Figura 12-13

EXERCÍCIO 12-11

$$\frac{0,120 \Delta T_c}{P_{MPa}} = 0,349109 + 6,00940S + 0,047467S^2$$

$$\frac{0,120 \Delta T_c}{P_{MPa}} = 0,349109 + 6,00940(0,3072) + 0,047467(0,3072)^2 = 2,199$$

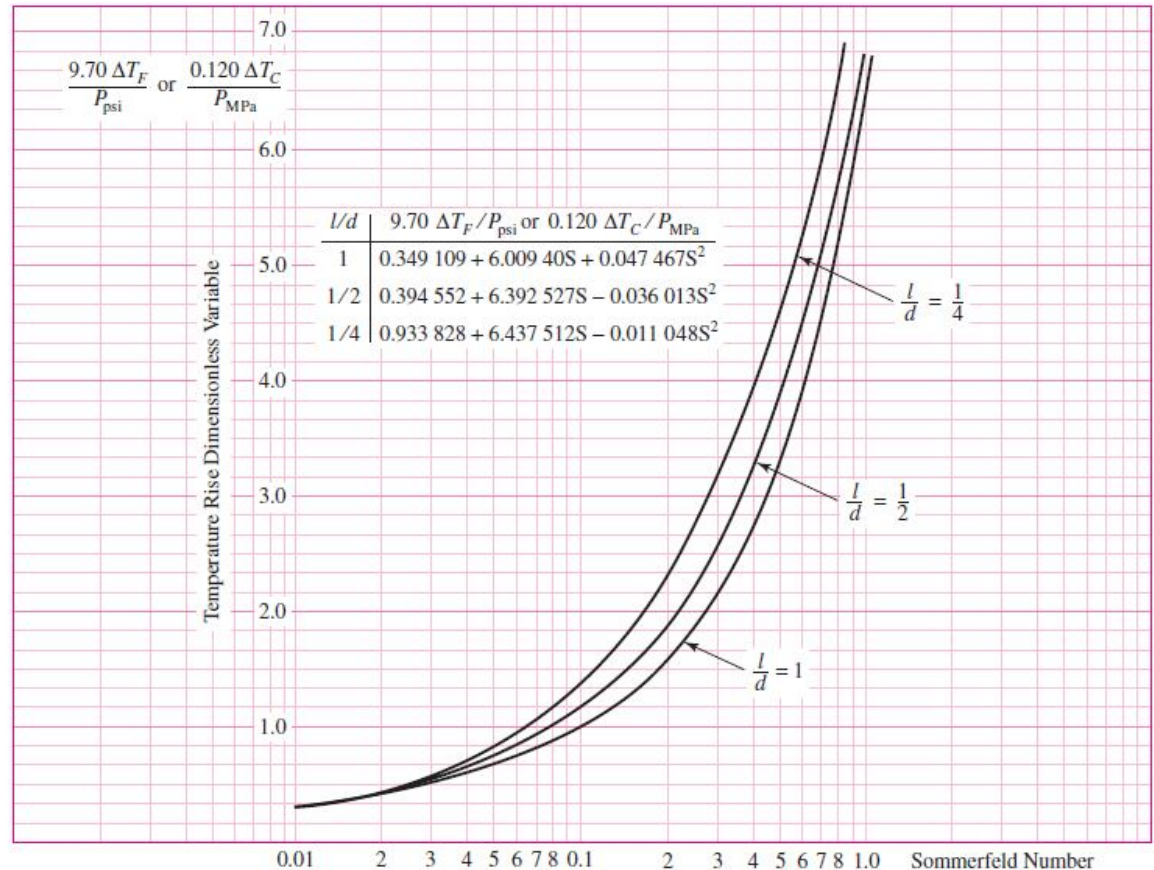
$$\frac{0,120 \Delta T_c}{0,46875} = 2,199$$

$$\Delta T_c = 8,59$$

Diferença:

$$\Delta T_c = 20 - 8,59 = 11,4^{\circ} C$$

Figura 12-24



EXERCÍCIO 12-11

2ª tentativa(temperatura média):

$$T_f = 65^{\circ} C$$

$$\mu = 20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

$$\Delta T = 2(65^{\circ} C - 60^{\circ} C) = 10^{\circ} C$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \frac{\mu N}{P}$$

$$S = (1000)^2 \frac{(20 \cdot 10^{-3})8}{0,46875 \cdot 10^6} = 0,341$$

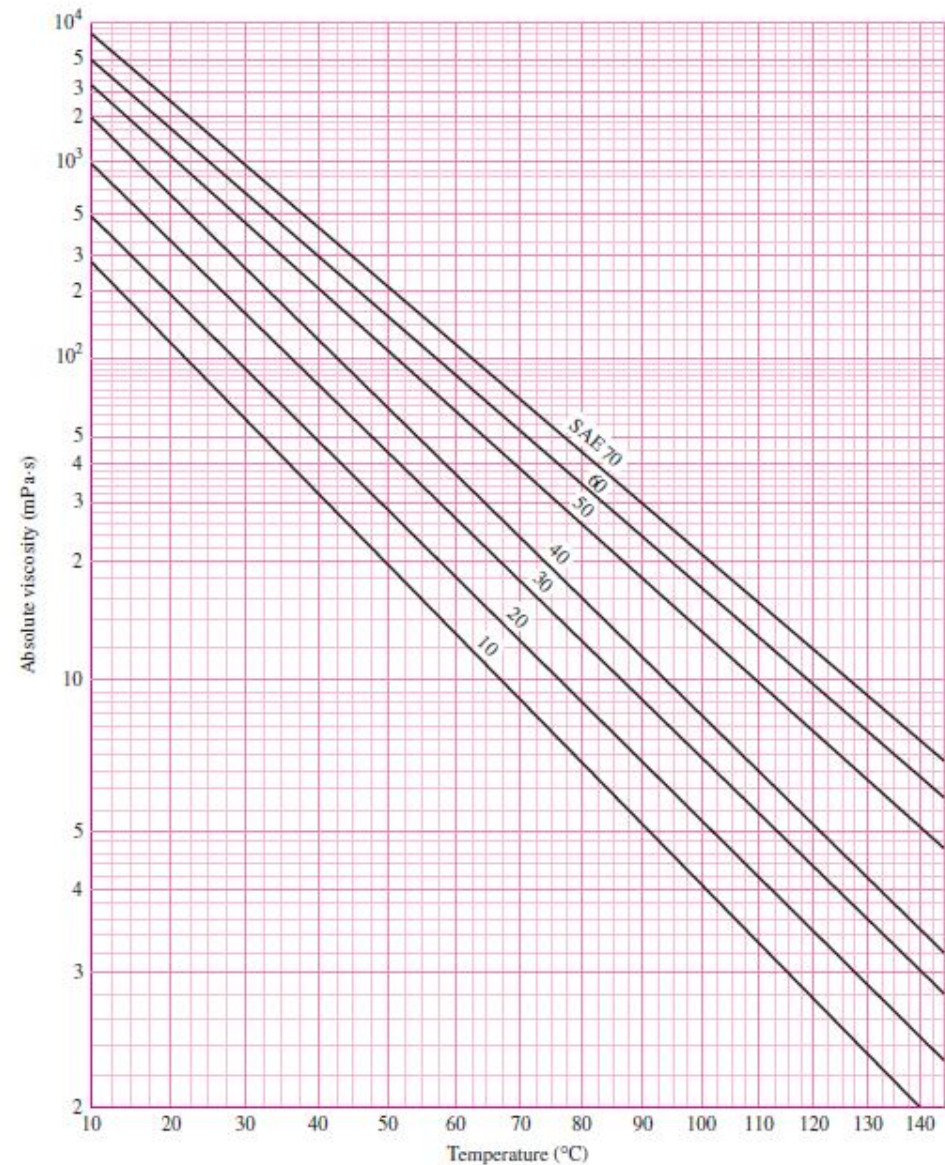


Figura 12-13

EXERCÍCIO 12-11

$$\frac{0,120 \Delta T_c}{P_{MPa}} = 0,349109 + 6,00940(0,341) + 0,047467(0,341)^2 = 2,403$$

$$\frac{0,120 \Delta T_c}{0,46875} = 2,403$$

$$\Delta T_c = 9,39$$

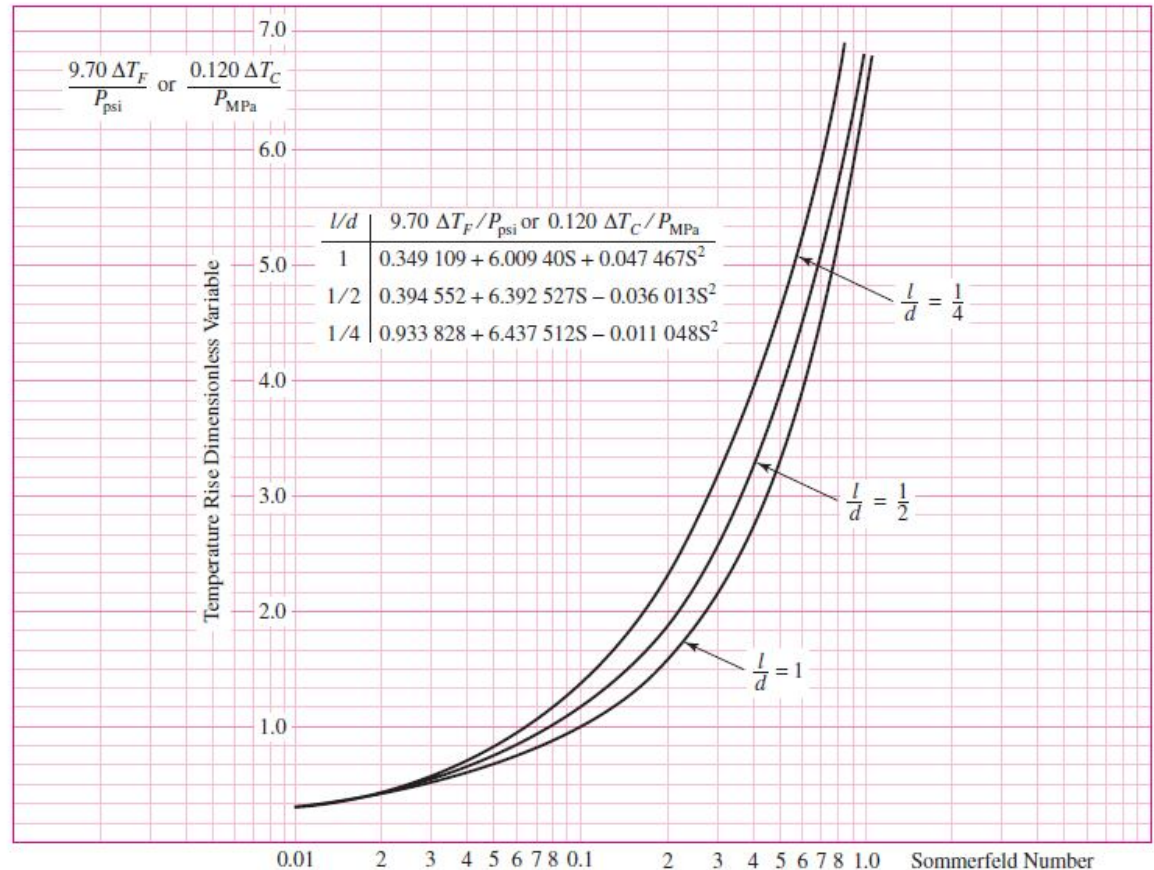
Diferença:

$$\Delta T_c = 10 - 9,39 = 0,61^{\circ}C$$

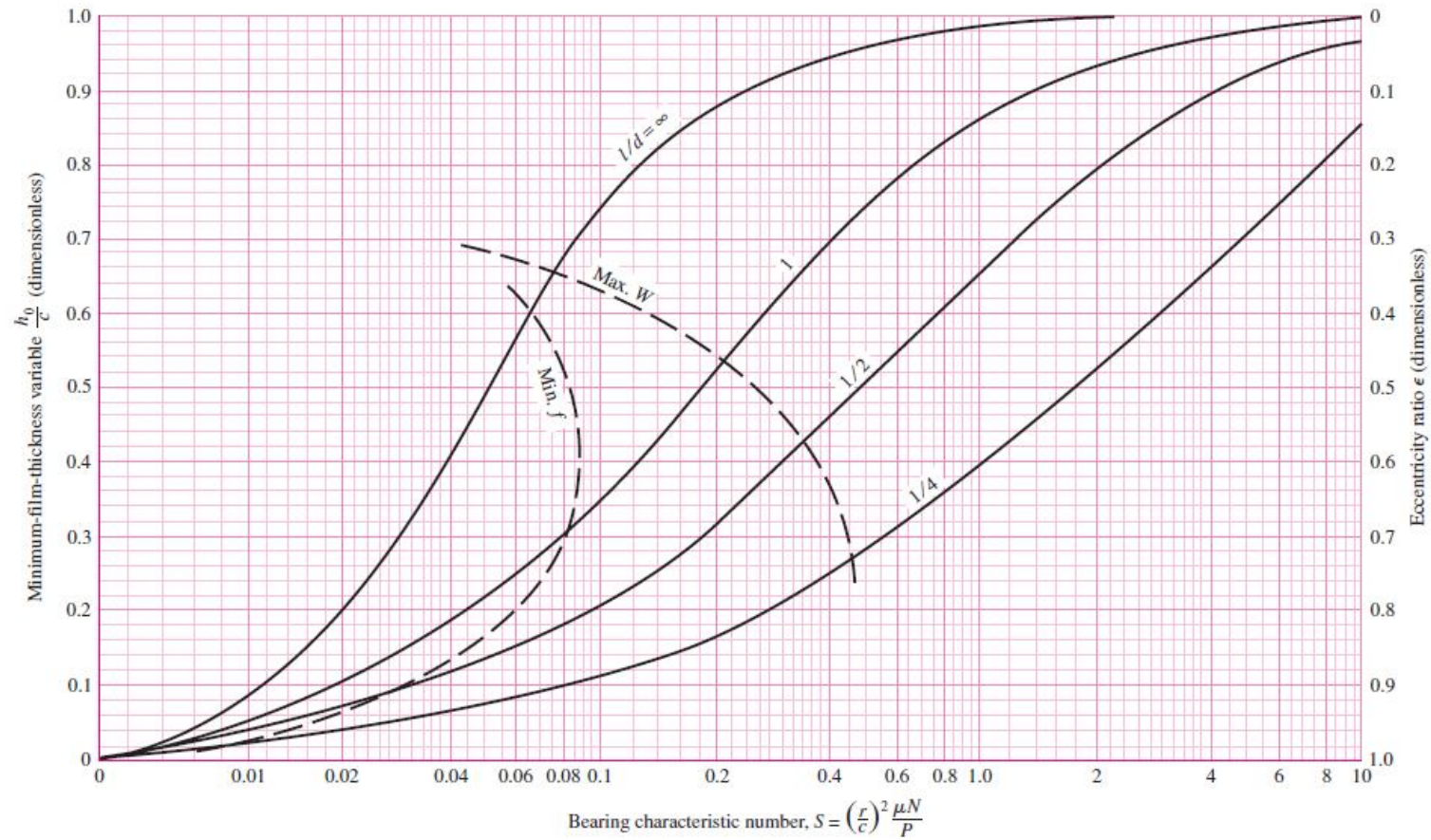
OK

$$T_{med} = 65^{\circ}C$$

Figura 12-24



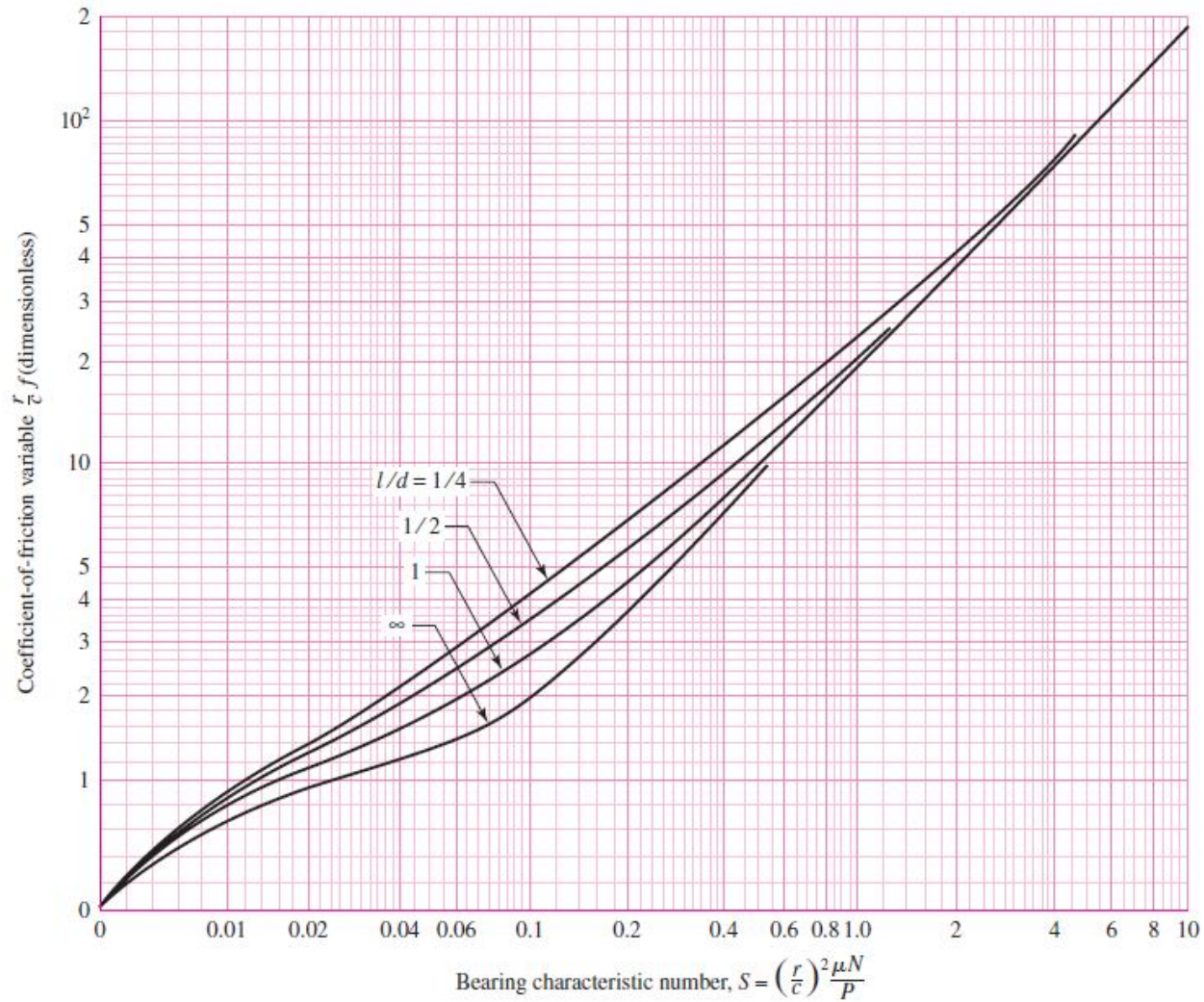
EXERCÍCIO 12-11



$$\frac{h_0}{c} = 0,65$$

$$h_0 = 0,65(0,04) = 0,026mm$$

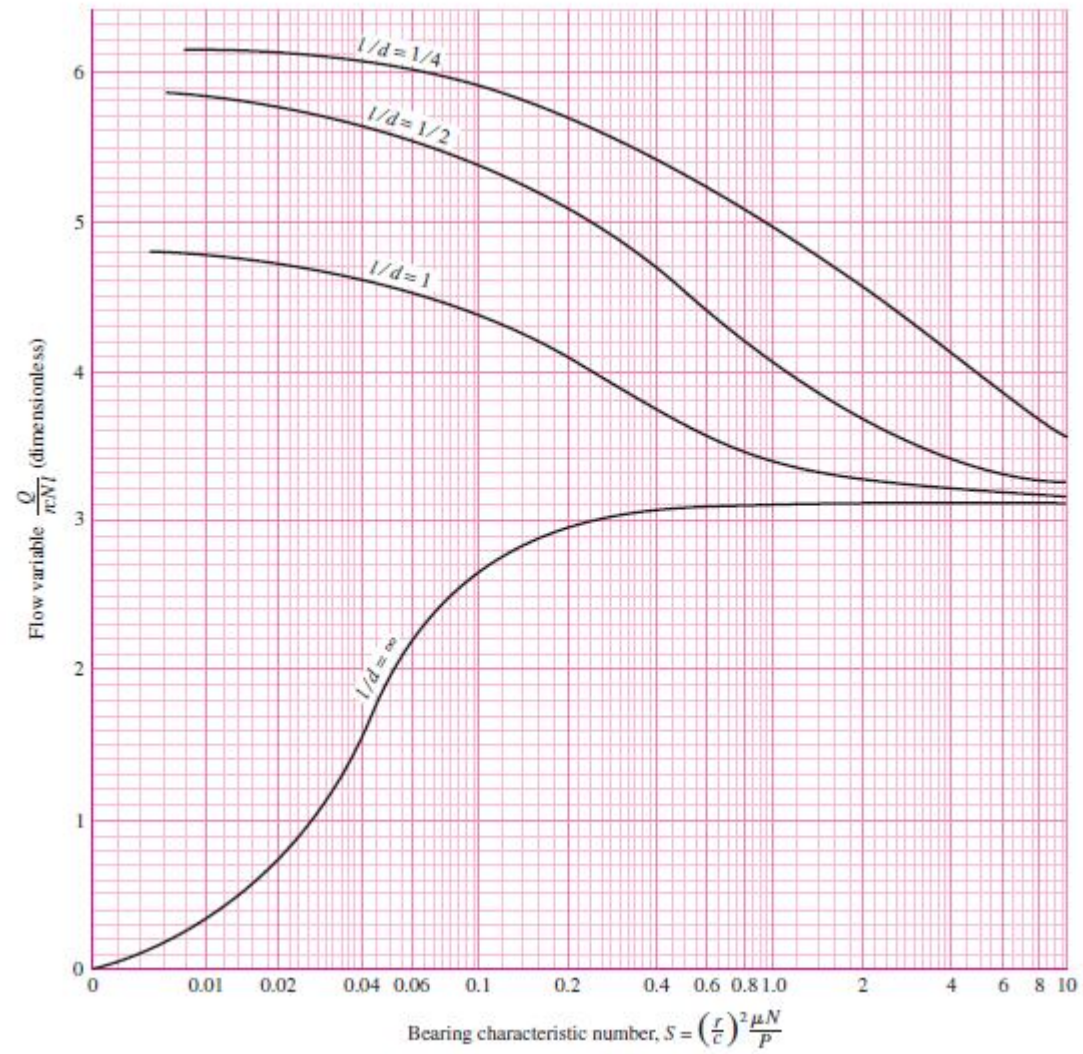
EXERCÍCIO 12-11



$$\frac{f r}{c} = 7,5$$

$$f = 0,0075$$

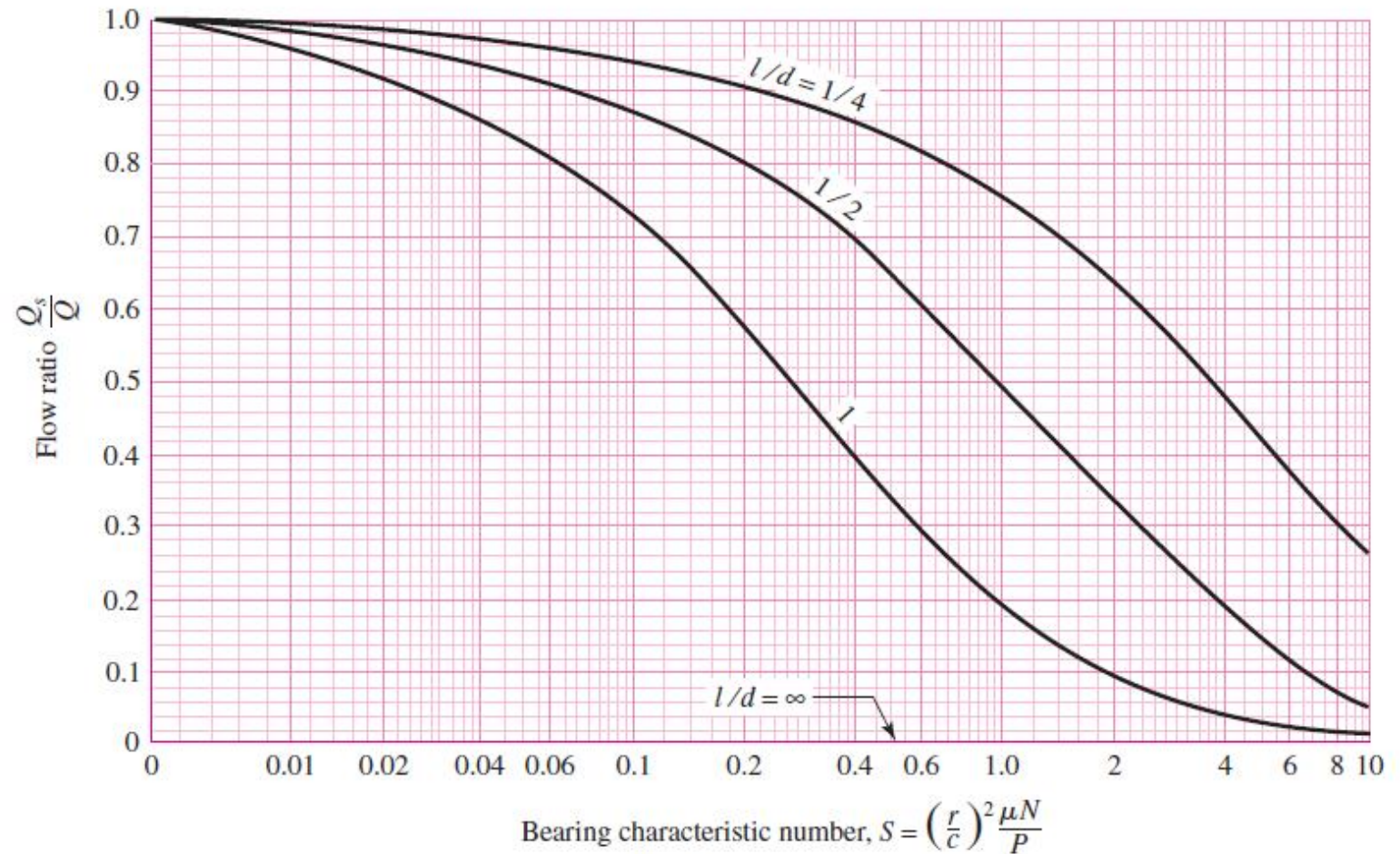
EXERCÍCIO 12-11



$$\frac{Q}{rNcl} = 3,9$$

$$Q = 3,9(40)8(0,04)80 = 3994 \text{ mm}^3 / \text{s}$$

EXERCÍCIO 12-11



$$\frac{Q_s}{Q} = 0,45$$

$$Q_s = (0,45)3994 \text{ mm}^3 / \text{s} = 1797 \text{ mm}^3 / \text{s}$$

EXERCÍCIO 12-11

$$T = f W r = 0,0075(3000)0,04 = 0,9 \text{ N.m}$$

$$H = 2\pi N T = 2\pi 8(0,9) = 45,2 \text{ W}$$

CRITÉRIOS DE PROJETO DE TRUMPLER PARA MANCAIS DE MUNHÃO

- Como a montagem de um mancal cria a pressão de lubrificante para carregar uma carga, ele reage ao carregamento mudando sua excentricidade, a qual reduz a espessura mínima de filme h_0 até que a carga seja suportada.

- Qual o limite de h_0 ?

Trumpler:

- As tolerâncias tendem a aumentar com o tamanho;

- Garganta de pelo menos 200 μin para passar partículas das superfícies de fundo.

$$h_0 \geq 0,0002 + 0,00004 d \text{ in}$$

CRITÉRIOS DE PROJETO DE TRUMPLER PARA MANCAIS DE MUNHÃO

- Lubrificantes reagem ao aumento da temperatura, vaporizando os componentes mais leves e deixando para trás os mais pesados.
- Desta forma, aumenta-se vagarosamente a viscosidade do lubrificante restante, o que eleva a taxa de geração de calor e as temperaturas do lubrificante.
- Para óleos leves:

$$T_{\max} \leq 250^{\circ}F$$

- Como o mancal de munhão consiste geralmente em um munhão retificado de aço trabalhado contra uma bucha mais mole, a carga de arranque dividida pela área projetada está limitada a:

$$\frac{W_{st}}{lD} \leq 300 \text{ psi} = 2,07 \text{ MPa}$$

$$n_d = 2,0$$

Para óleos leves.

EXERCÍCIO RESOLVIDO - 12-6

Um mancal de alimentação por pressão de sulco circunferente é lubrificado com óleo SAE grau 20, fornecido a uma pressão no medidor de 30 psi. O diâmetro do munhão d_j é de 1,750 in (44,45 mm), com uma tolerância unilateral de -0,002 in (-0,0508 mm). A bucha circunferente central tem um diâmetro d_b de 1,753 in (44,526 mm), com uma tolerância unilateral de +0,004 in (0,101 mm). A razão l'/d dos dois “meio-mancais” é $\frac{1}{2}$. A velocidade angular do munhão é de 300 rpm, ou 5 revs/seg, e a carga permanente radial é de 900 lbf (4005 N). O reservatório externo é mantido a 120°F (48,9°C), desde que a transferência de calor necessária não exceda 800 Btu/h.

b) Compare h_o , T_{\max} e P_{st} com o critério de Trumpler.

c) Estime o fluxo lateral volumétrico Q_s , a taxa de perda de calor H_{perda} e o torque parasita de fricção.

$$r = \frac{d_j}{2} = \frac{44,45\text{mm}}{2} = 22,225\text{mm}$$

$$c_{\min} = \frac{d_{\text{buch}}_{\min} - d_{\text{eixo}}_{\max}}{2} = \frac{44,526 - 44,45}{2} = 0,038\text{mm}$$

$$\frac{l'}{d} = \frac{1}{2}$$

$$l' = \frac{d}{2} = r = 22,225\text{mm}$$

Resultados encontrados no livro:

$$\Delta T_F = 97,1^{\circ}F = 36,16^{\circ}C$$

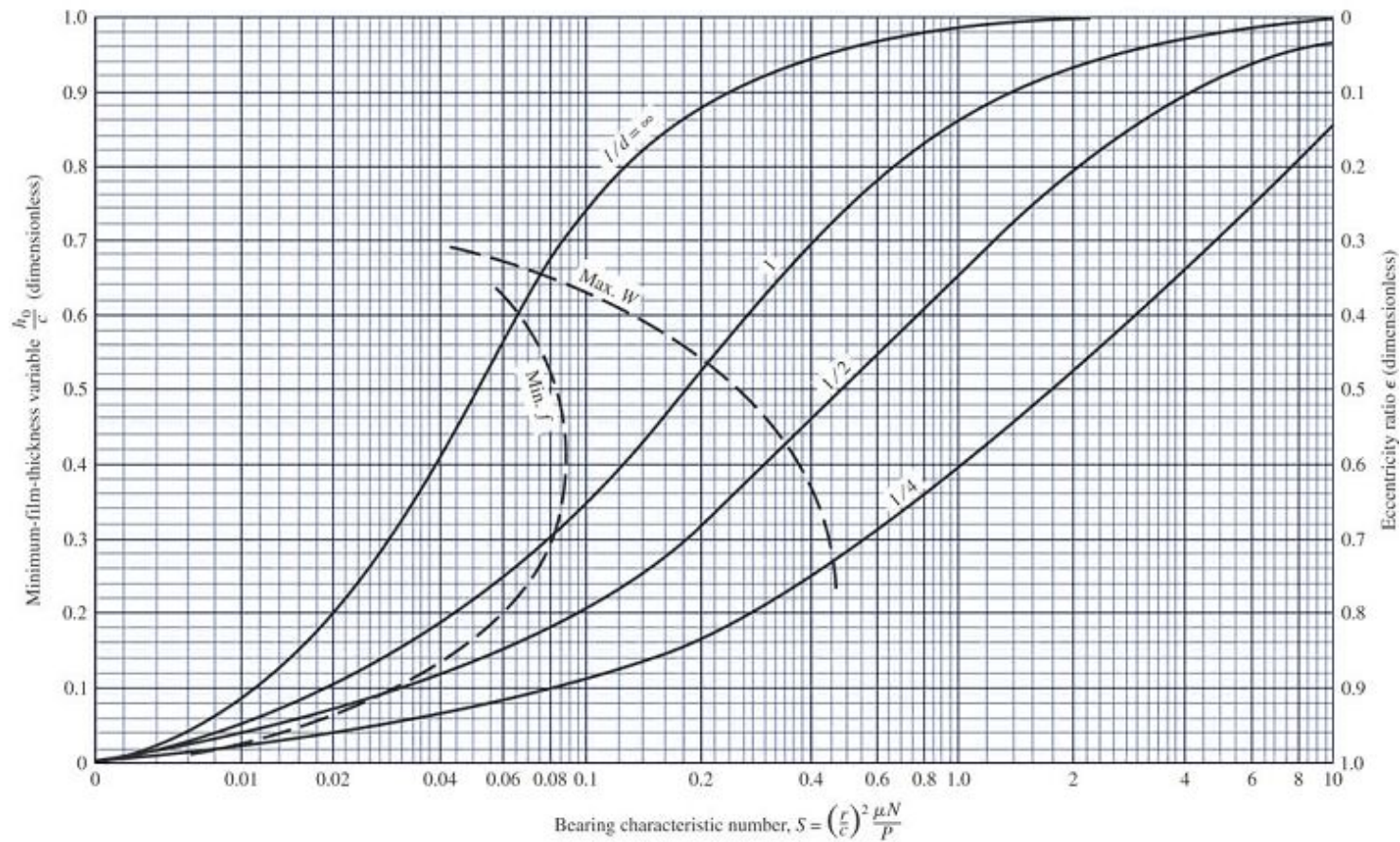
$$T_{\max} = 120 + 97,1 = 217,1^{\circ}F = 102,83^{\circ}C$$

$$T_{\max} = 217,1^{\circ}F \leq 250^{\circ}F$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO - 12-6

$$S = 0,0980$$

Da Figura 12-16:



$$\epsilon = \frac{e}{c}$$

$$\frac{h_0}{c} = 0,2$$

$$\frac{c - e}{c} = 0,2$$

$$1 - \epsilon = 0,2$$

$$\epsilon = 0,8$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO - 12-6

b)

$$h_0 = (1 - \varepsilon)c$$

$$h_0 = (1 - 0,8)0,038mm = 0,0076mm$$

$$h_0 \geq 0,0002 + 0,00004d \text{ in}$$

$$h_0 \geq 0,0002 + 0,00004(1,750) \text{ in}$$

$$h_0 \geq 0,00027 \text{ in}$$

$$h_0 \geq 0,00686mm \quad \text{OK}$$

$$\frac{W_{st}}{lD} = 294 \text{ psi} \leq 300 \text{ psi}$$

OK, porém o fator de segurança é muito próximo de um.

EXERCÍCIO RESOLVIDO - 12-6

c) A partir da equação (12-22):

$$Q_s = (1 + 1,5\varepsilon^2) \frac{\pi p_s c^3 r}{3\mu l'} = 0,123 \text{ in}^3 / \text{s}$$

$$H_{\text{perda}} = \rho C_p Q_s \Delta T = 0,0311(0,42)0,123(97,1) = 0,156 \text{ Btu} / \text{s}$$

$$H_{\text{perda}} = 0,156 \text{ Btu} / \text{s} \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} = 561,5 \text{ Btu} / \text{h}$$

$$T = f W r = \frac{fr}{c} Wc = 339(900)0,0015 = 4,58 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

REFERÊNCIAS

SHIGLEY, J.E., “Elementos de Máquinas 2”, LTC, 1984.

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, C.R., BUDYNAS, R.G., *Projeto de Engenharia mecânica, 7ª edição, Bookman.*