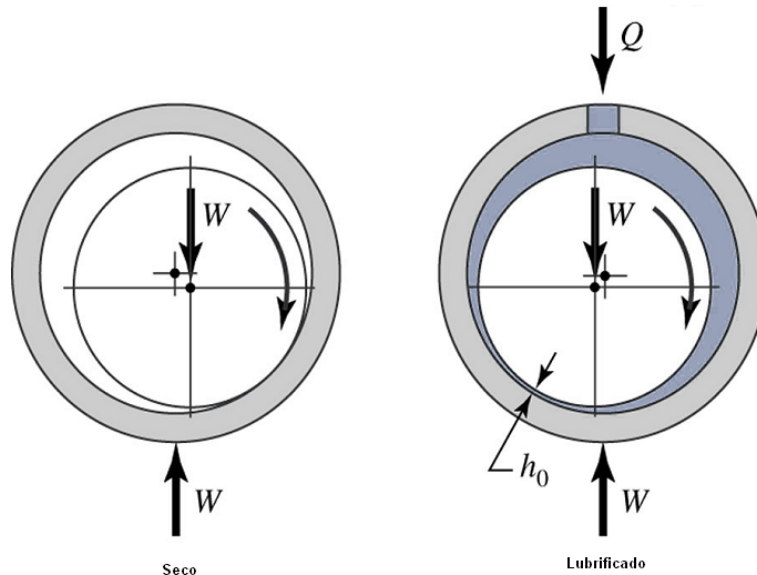


# LUBRIFICAÇÃO E MANCAIS RADIAIS

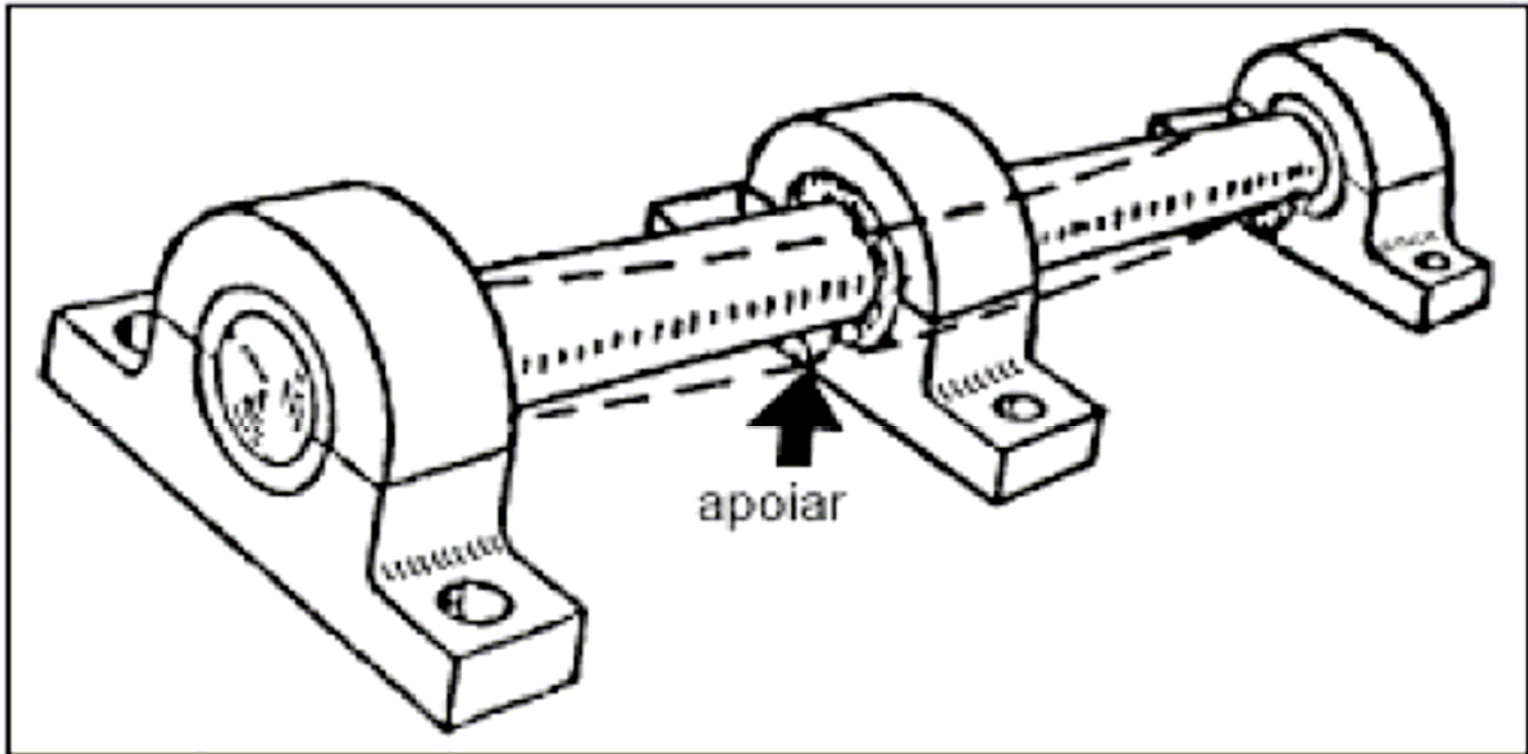
**Prof. Alexandre Augusto Pescador Sardá**

# 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.

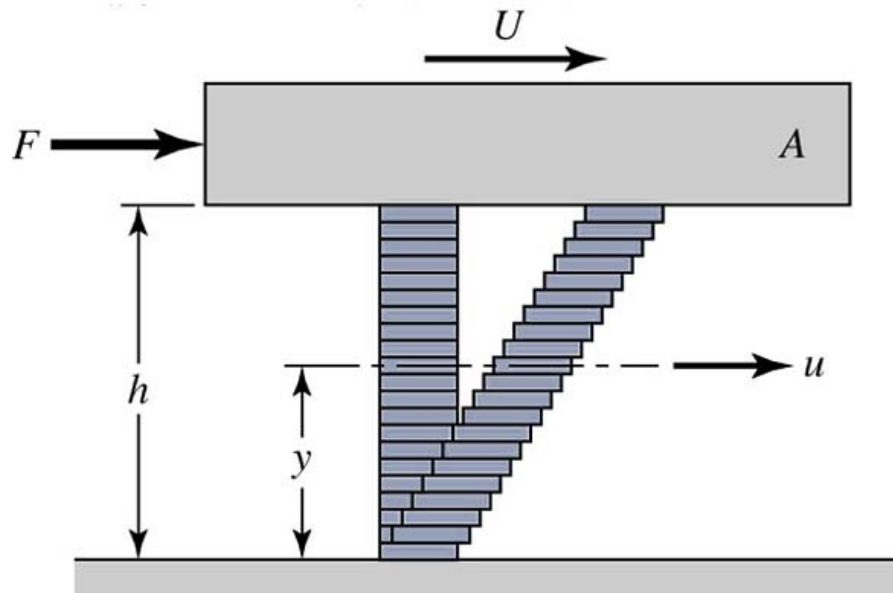
# TIPOS DE LUBRIFICAÇÃO

- 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.



# 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  $\mu$  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;
- $\mu$  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  $\nu$  tem como unidade o metro quadrado por segundo e a conversão é:

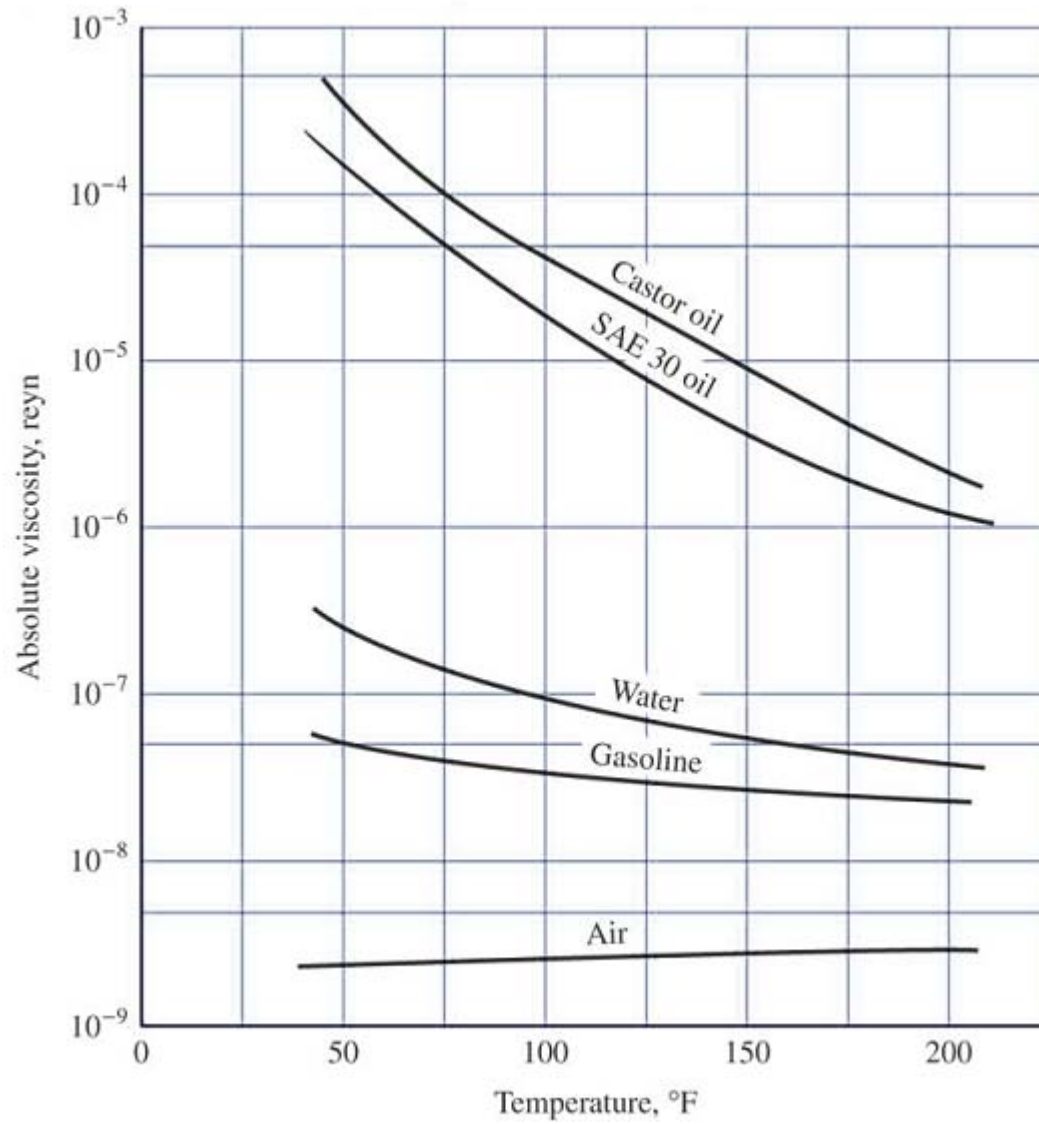
$$\nu(m^2 / s) = 10^{-6} Z_k \quad (cSt)$$

# VISCOSIDADE

- Para converter para viscosidade dinâmica, multiplica-se  $\nu$  pela massa específica:

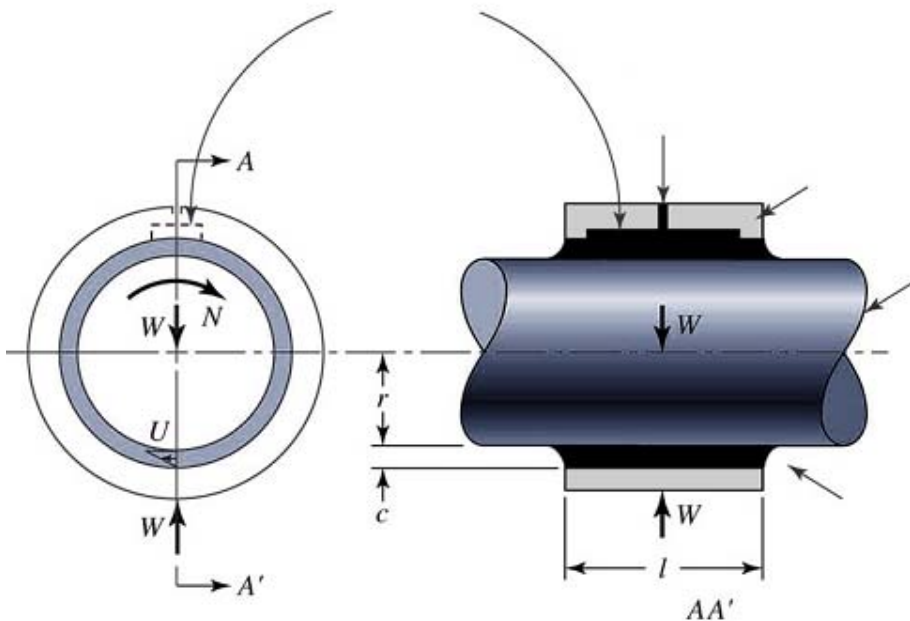
$$\mu = \rho \left( 0,22t - \frac{180}{t} \right) 10^{-6} \quad (Pa.s)$$

# VISCOSIDADE



# 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

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

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

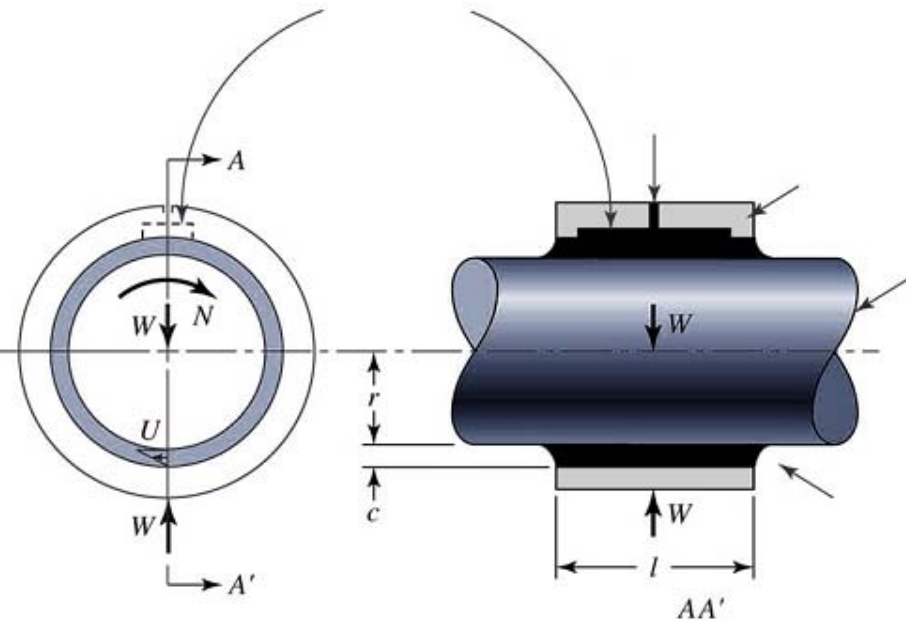
$$T = \frac{4\pi^2 r^3 l \mu N}{c}$$



# LEI DE PETROFF

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

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



Shigley

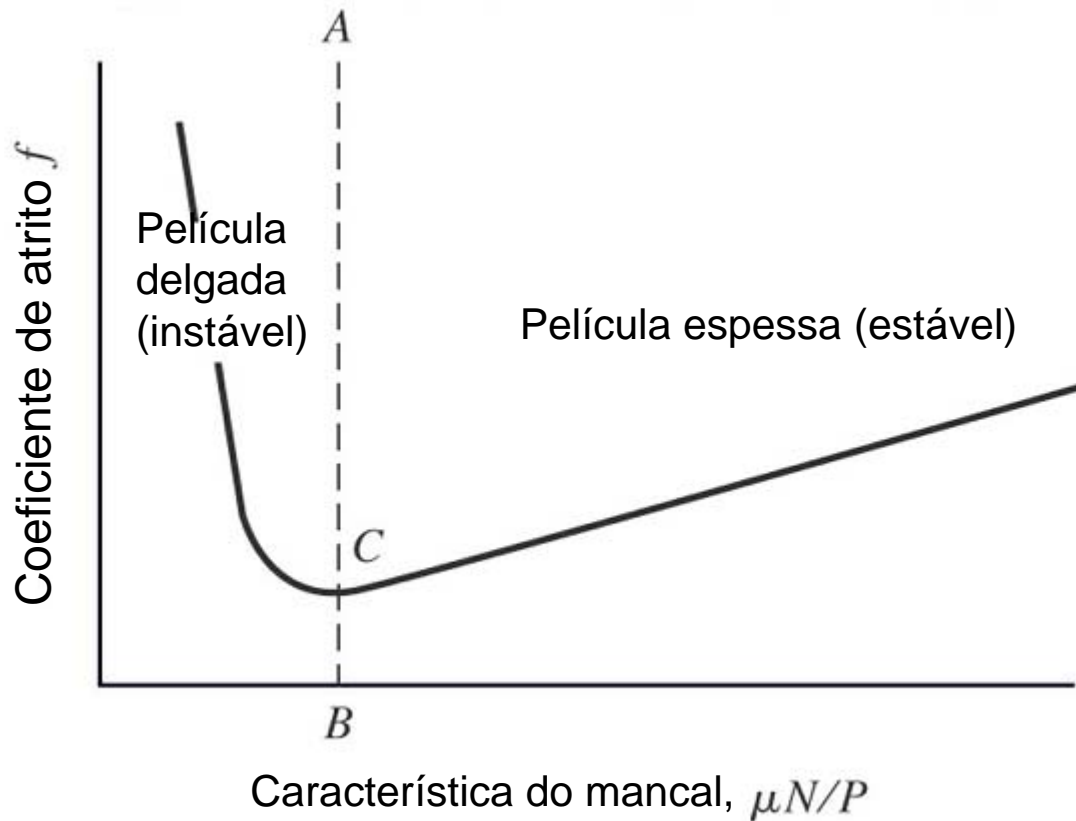
$$T = f W r = f (2 r l P)(r) = 2 r^2 f l P$$

$$f = 2\pi^2 \frac{\mu N r}{P c}$$

Lei de Petroff

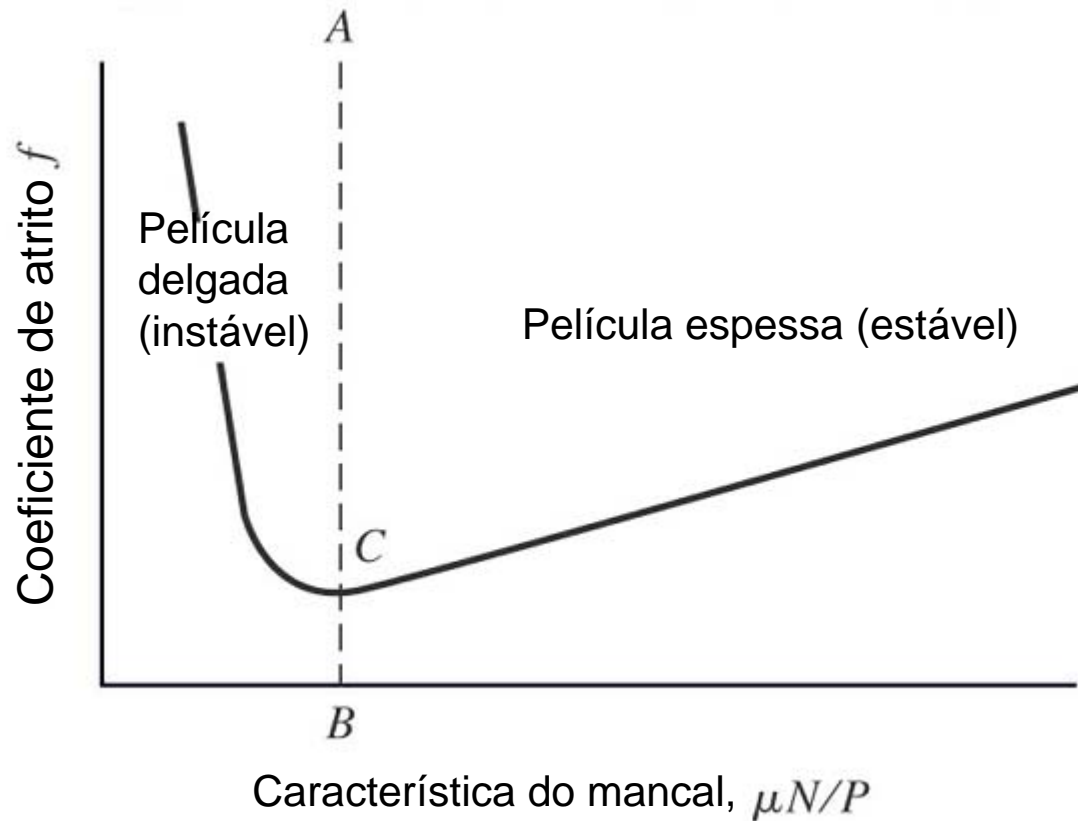
# LUBRIFICAÇÃO ESTÁVEL

- Operando à direita de BA, aumentando-se a  $T$ , 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.

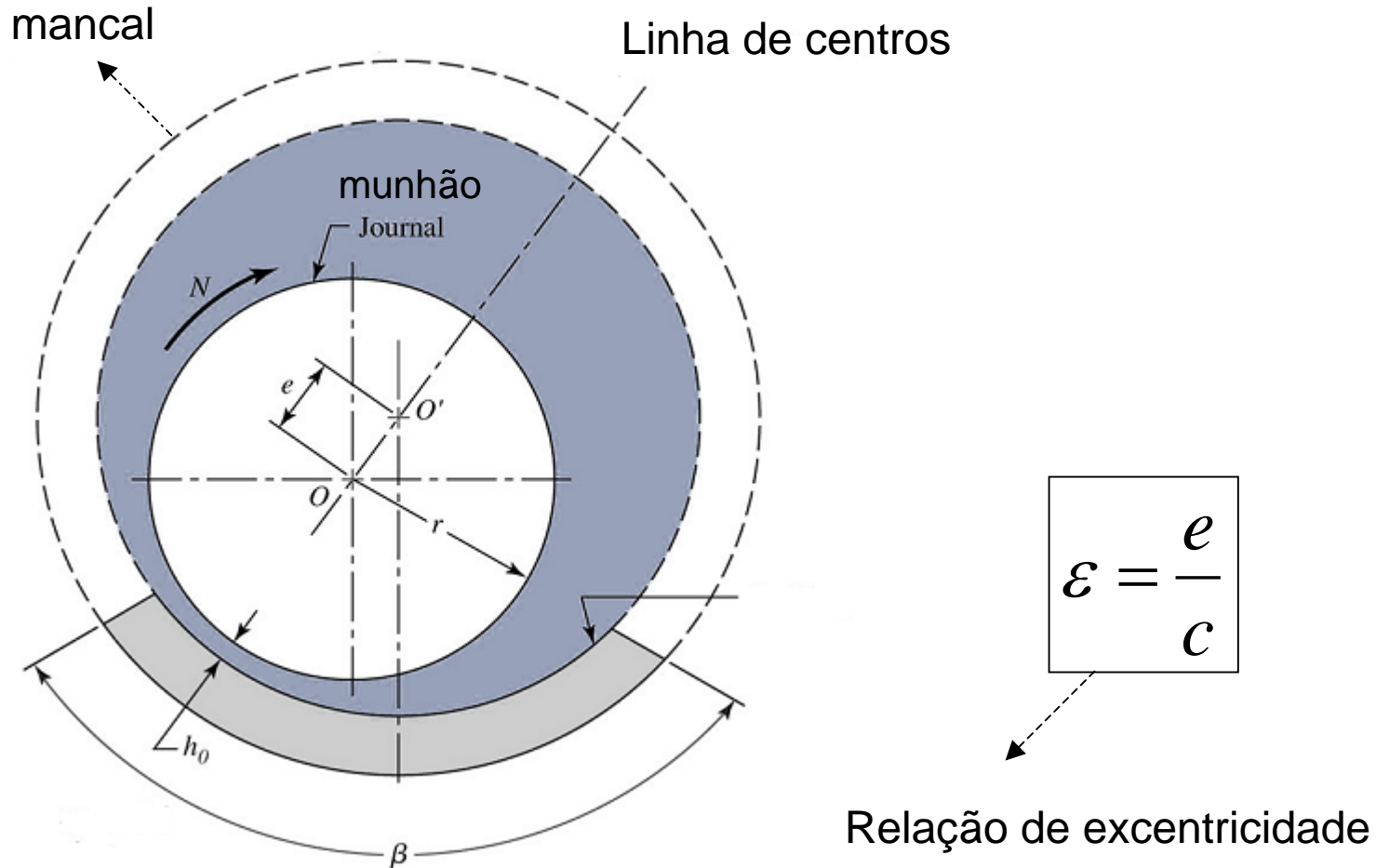


# LUBRIFICAÇÃO ESTÁVEL

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



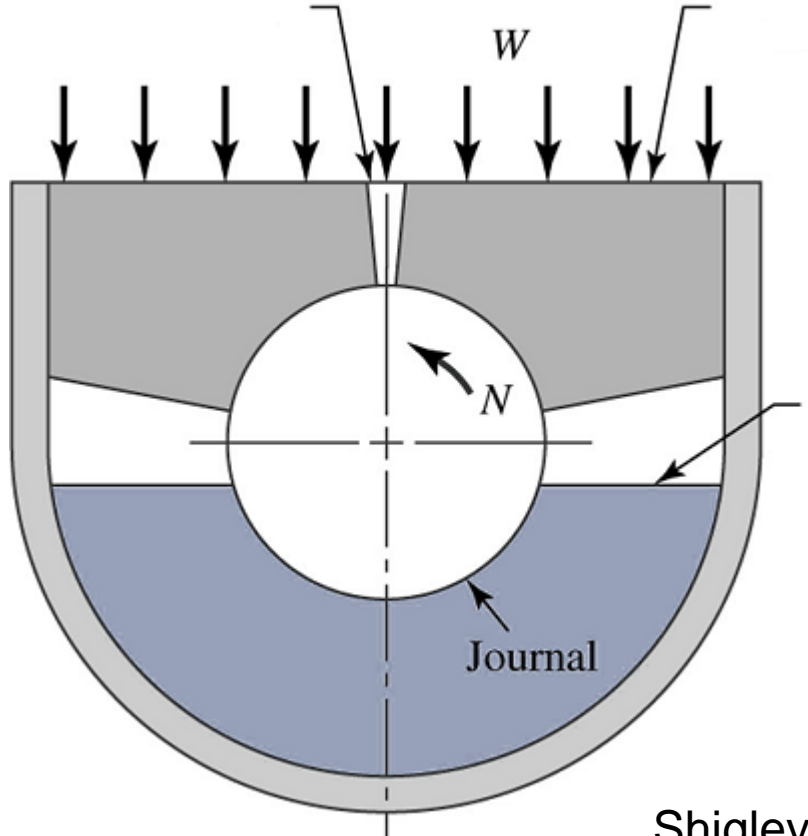
# LUBRIFICAÇÃO COM PELÍCULA ESPESSE



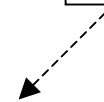
Shigley

# 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.

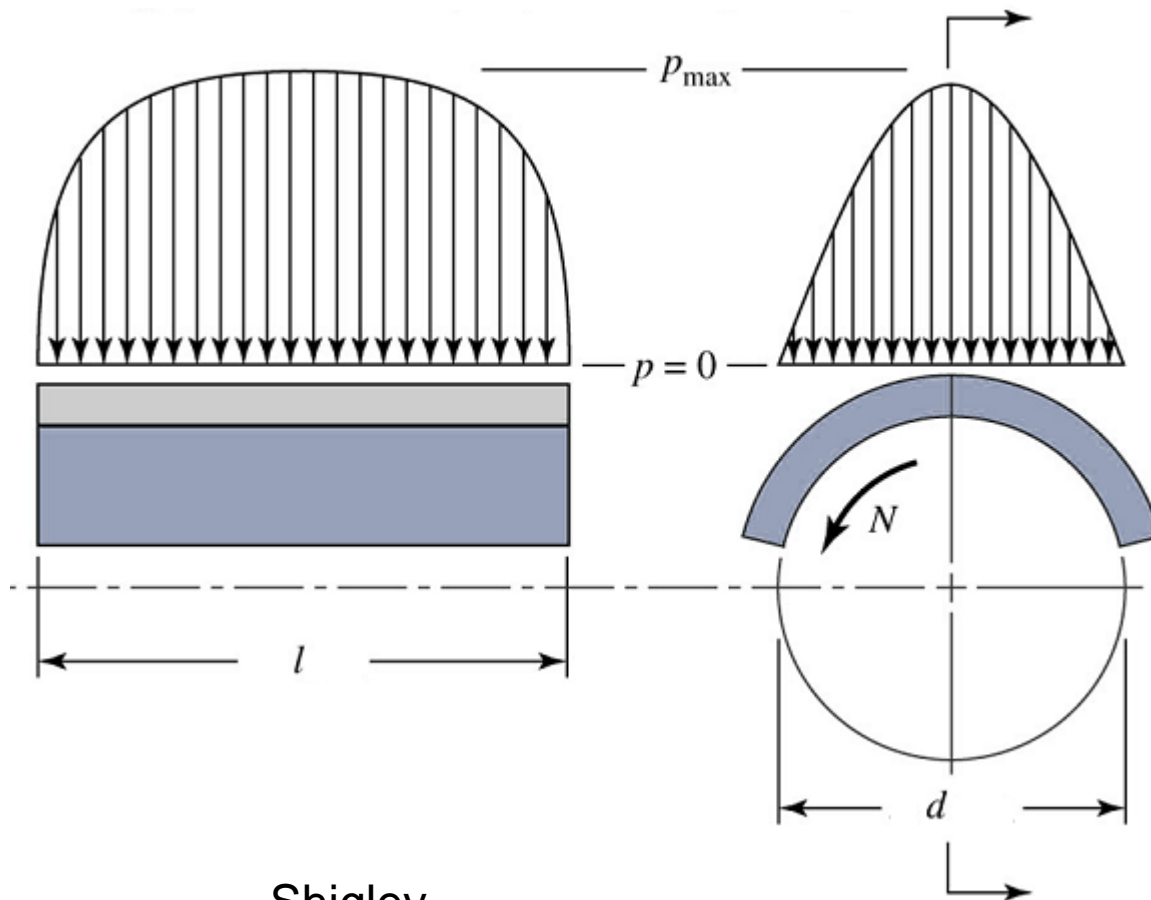


$$\varepsilon = \frac{e}{c}$$



# 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;

6 – Mancal e árvore infinitos na direção z;

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

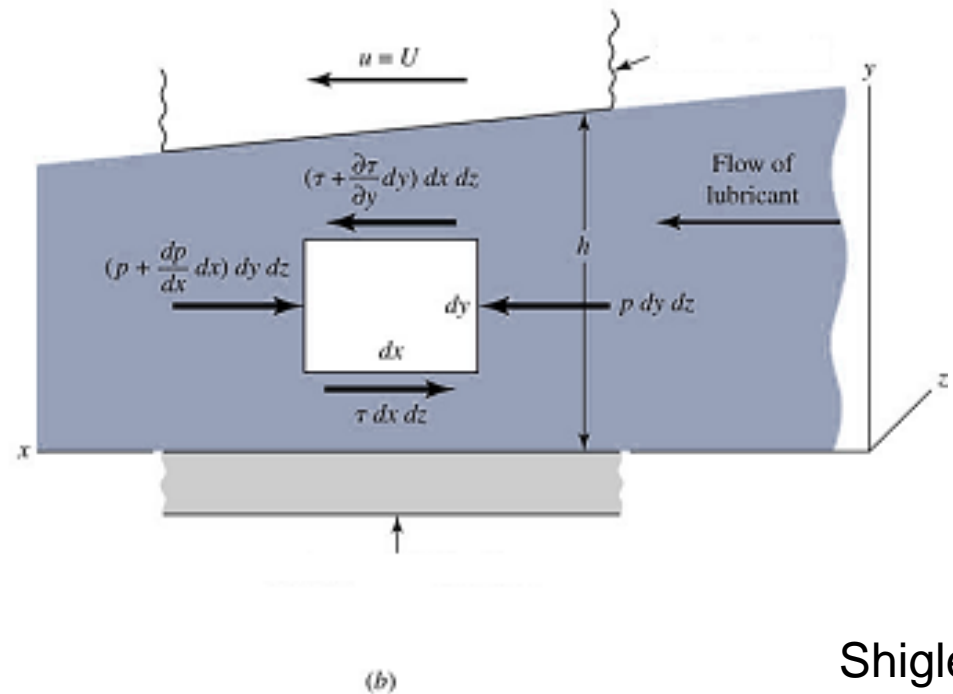
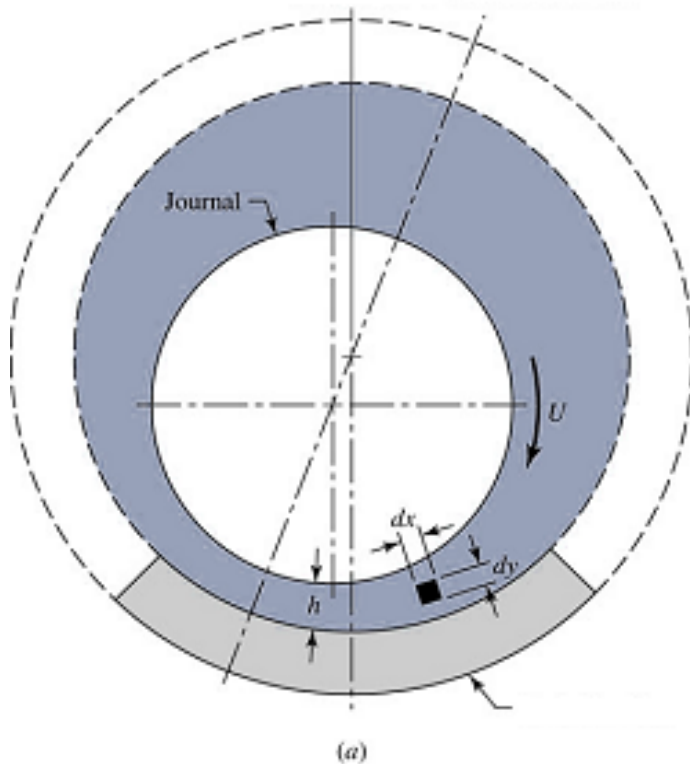
8 – Velocidade de qualquer partícula de lubrificante no filme depende somente das coordenadas x e y.

# TEORIA HIDRODINÂMICA

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:

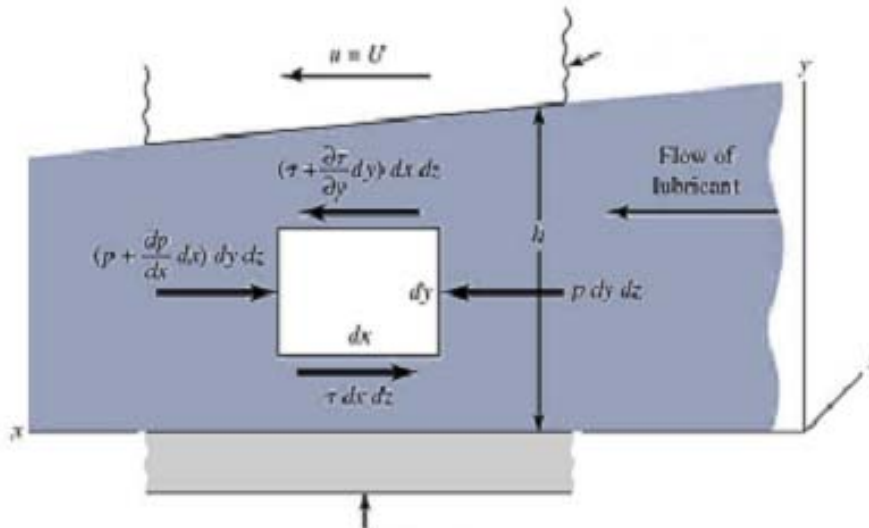
$$\sum F = \left( p + \frac{dp}{dx} dx \right) dy dz + \tau dx dz - \left( \tau + \frac{d\tau}{dy} dy \right) dx dz - p dy dz = 0$$

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

Mas:

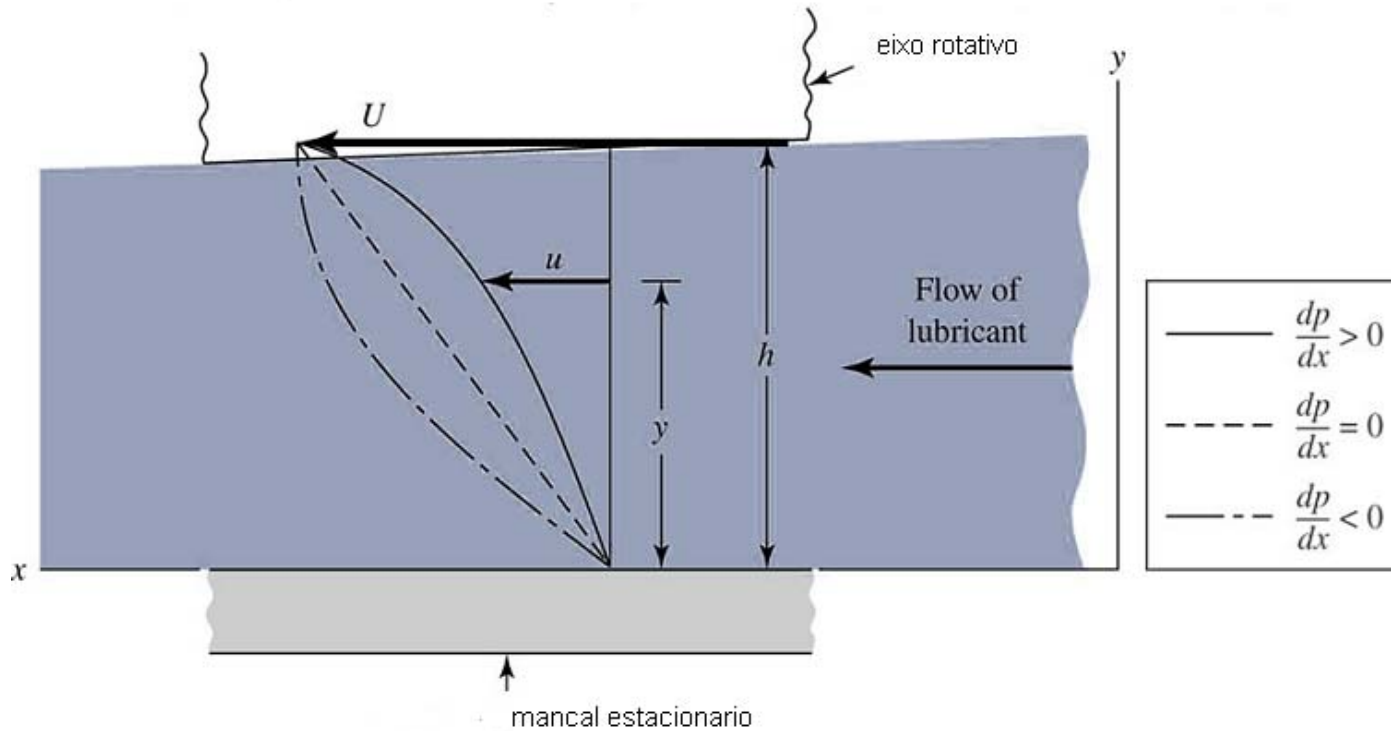
$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

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



# TEORIA HIDRODINÂMICA

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



Shigley

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

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

# TEORIA HIDRODINÂMICA

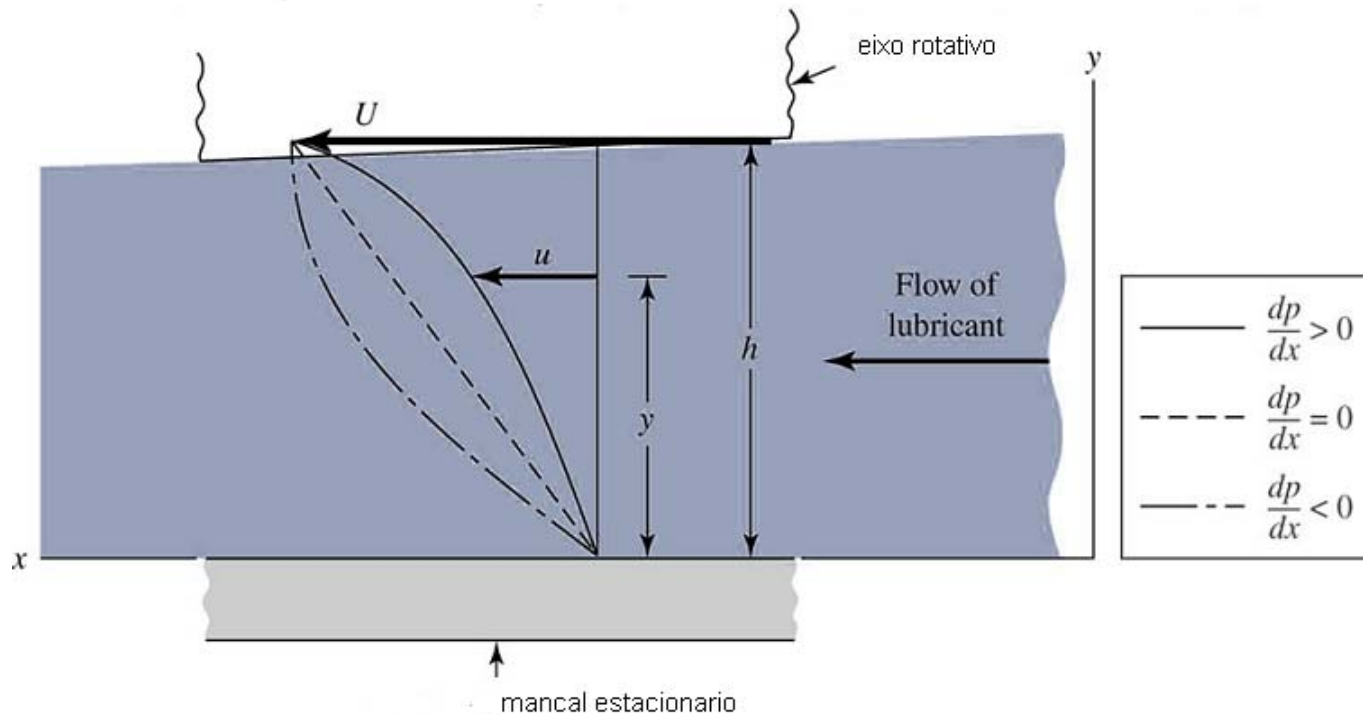
$$y = 0; \quad u = 0$$

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

$$C_2 = 0$$

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

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

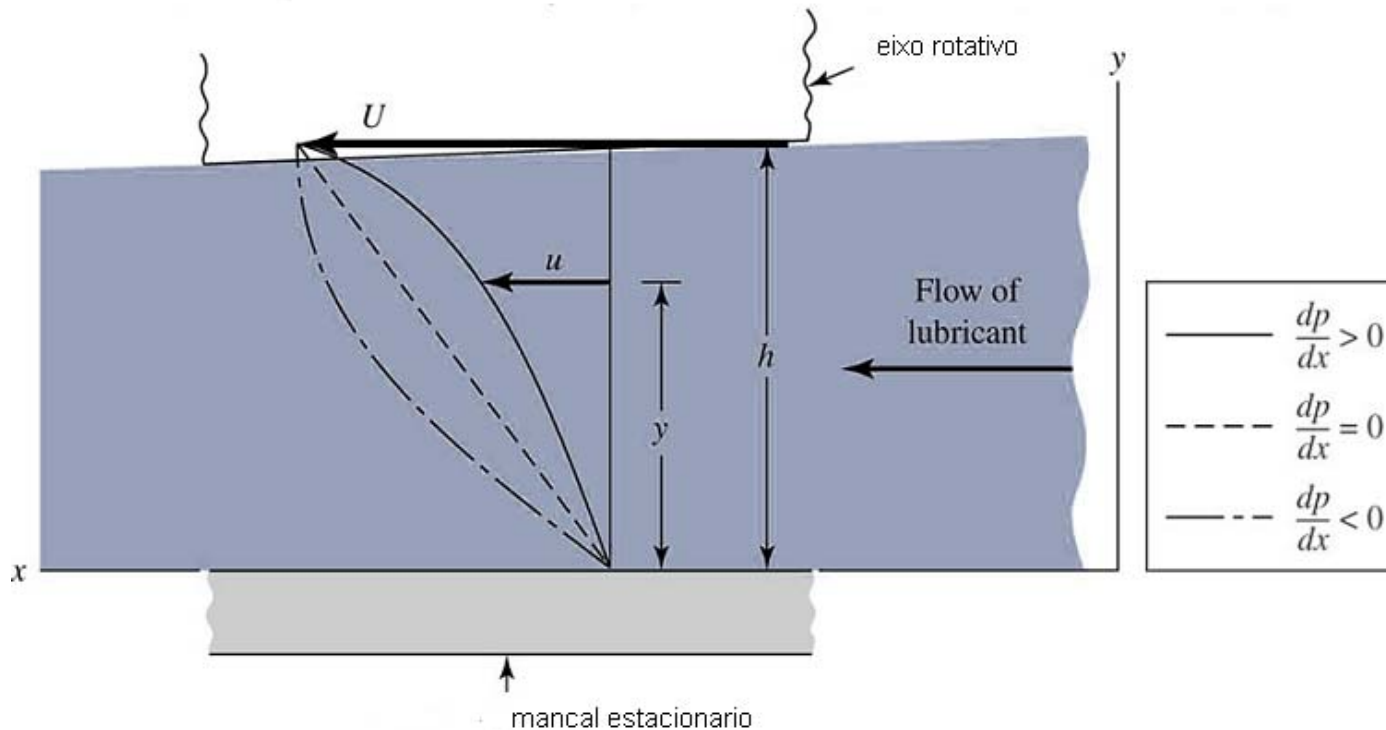


Shigley

# 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  $dp/dx$ .

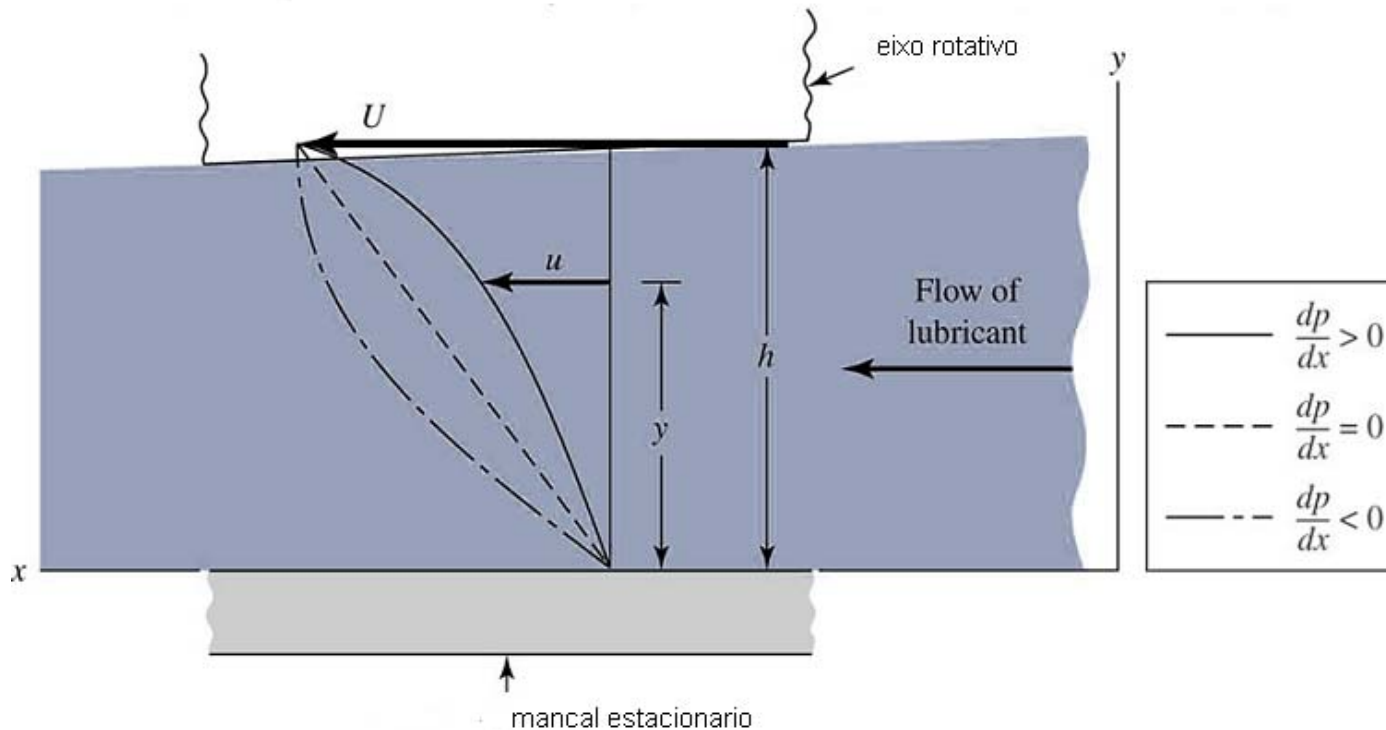


Shigley

# 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.

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

Uma das soluções importantes deve-se a Sommerfeld.

# FATORES DE PROJETO

Variáveis dadas ou sob controle do projetista:

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

Variáveis dependentes (fatores de projeto):

1. Coeficiente de atrito,  $f$ ;
2. O aumento de temperatura,  $\Delta T$ ;
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;

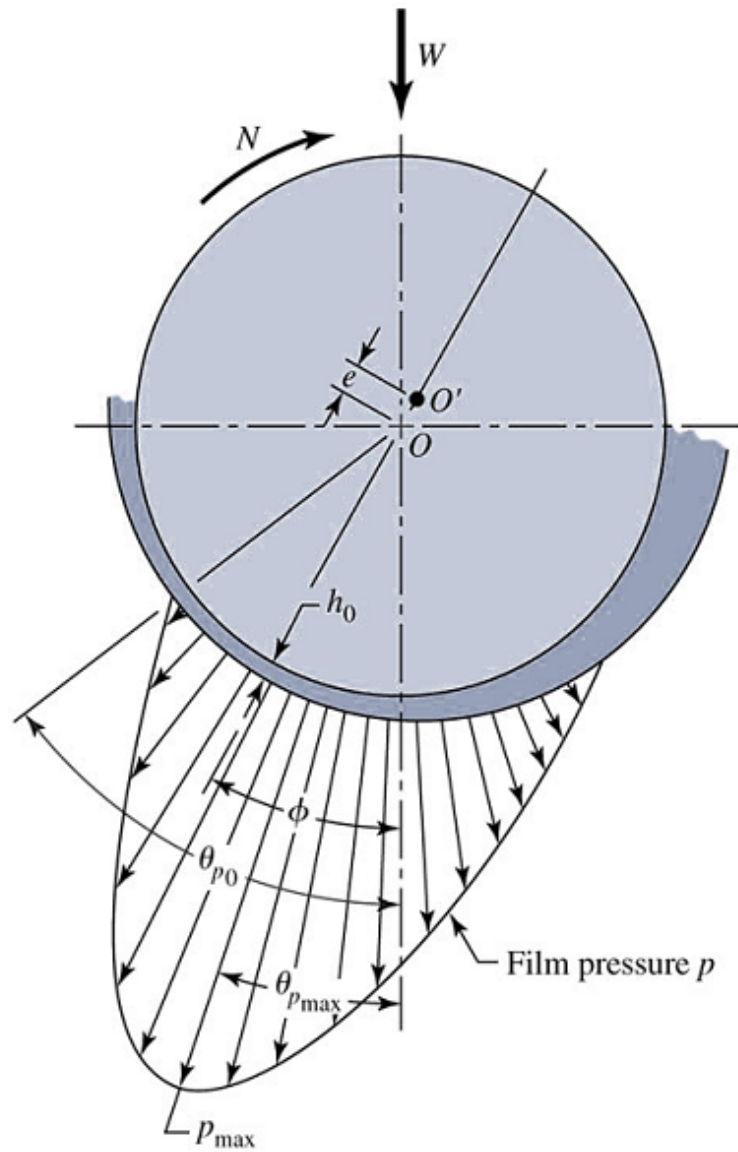
$\mu$  = viscosidade absoluta, Pa.s;

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

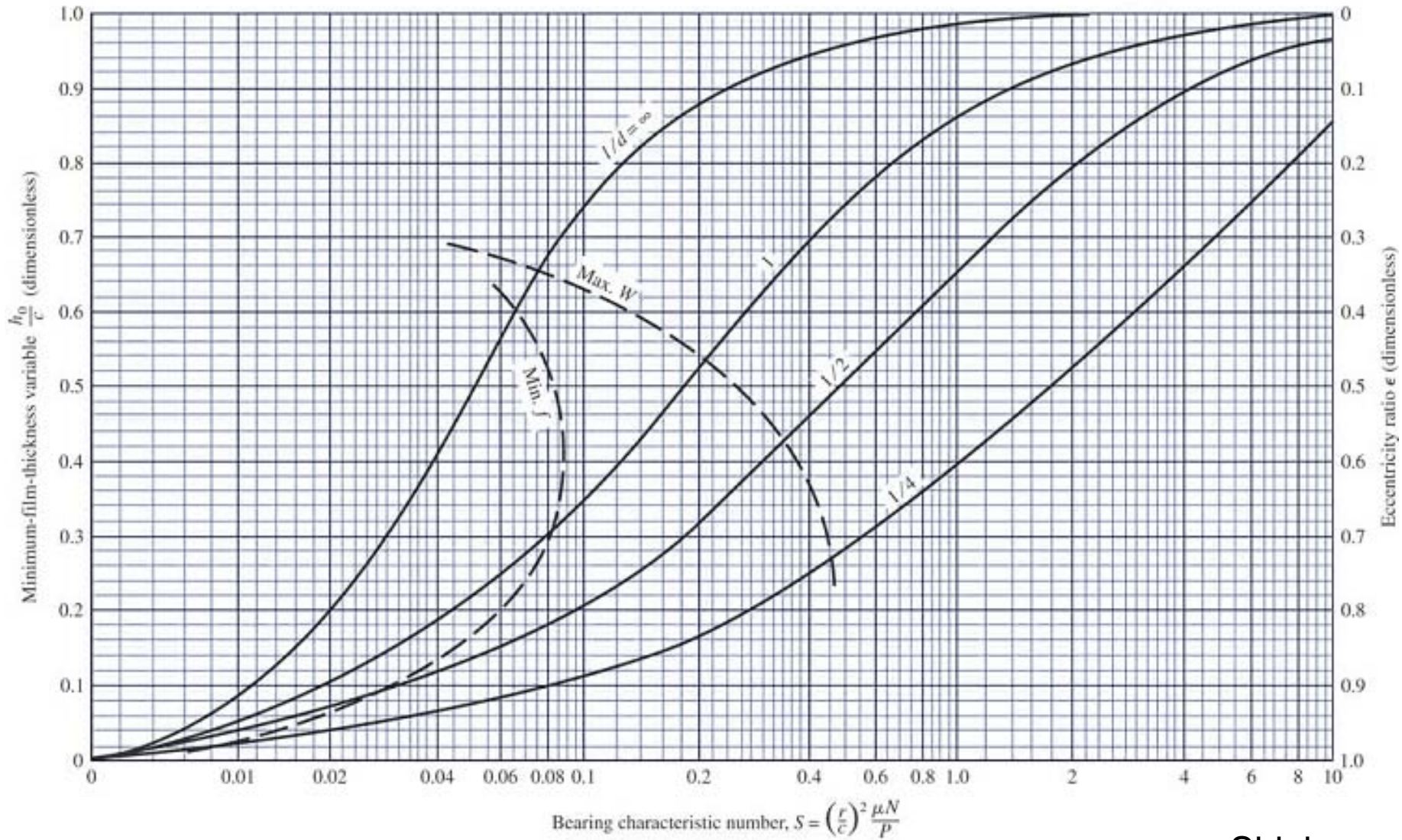
P = carga por unidade de área projetada, Pa.

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

# RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS

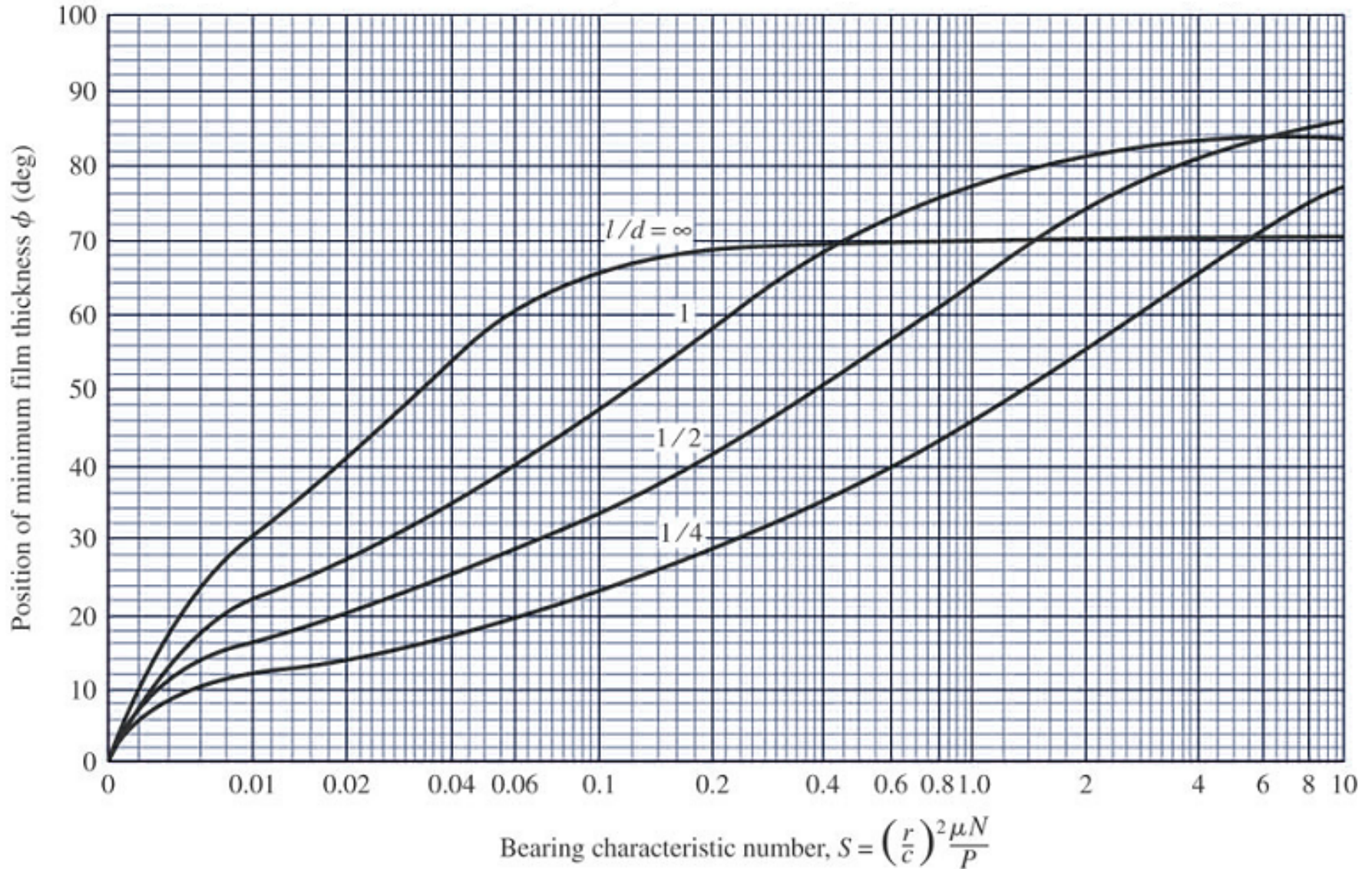


# RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS



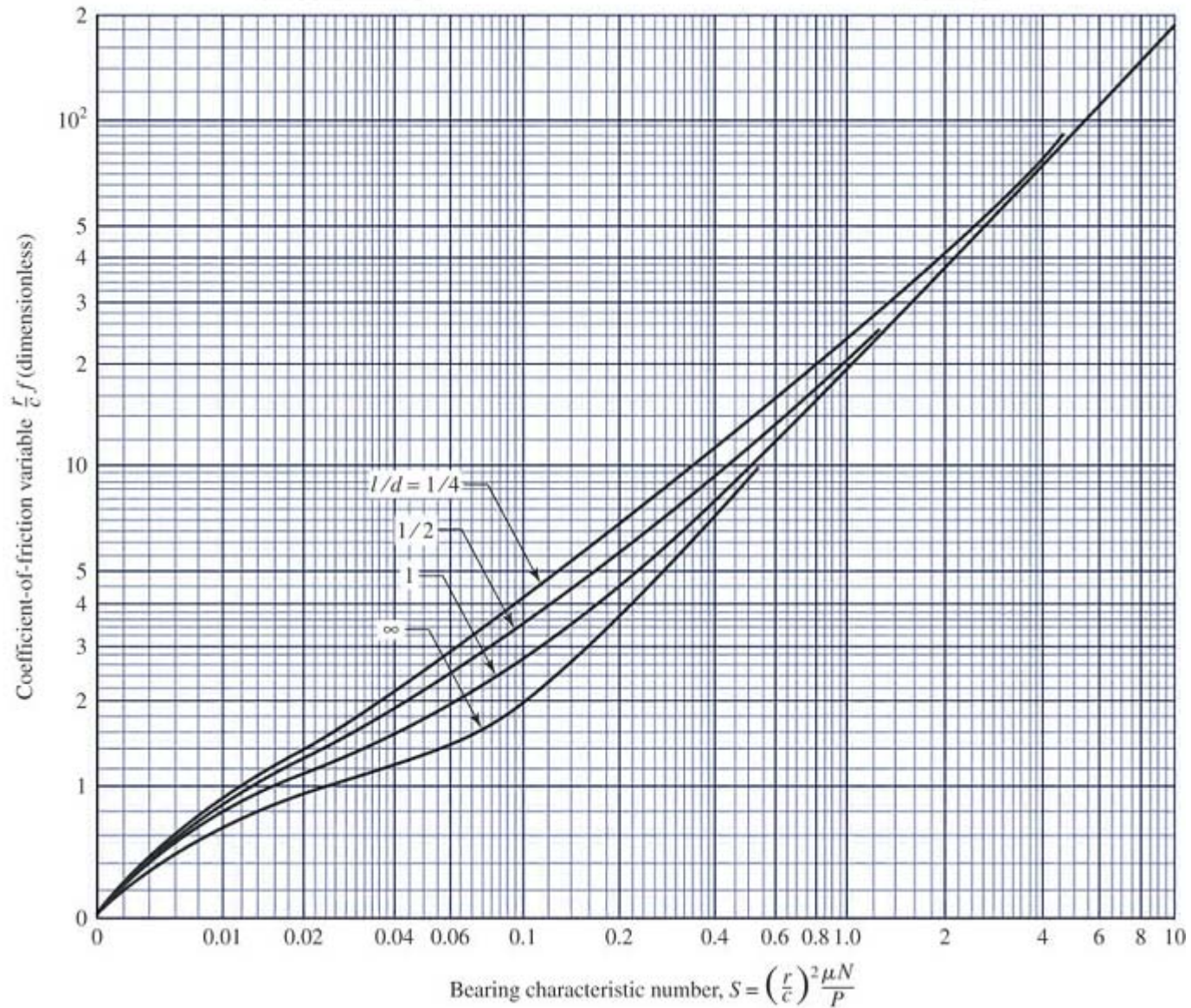


# RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS

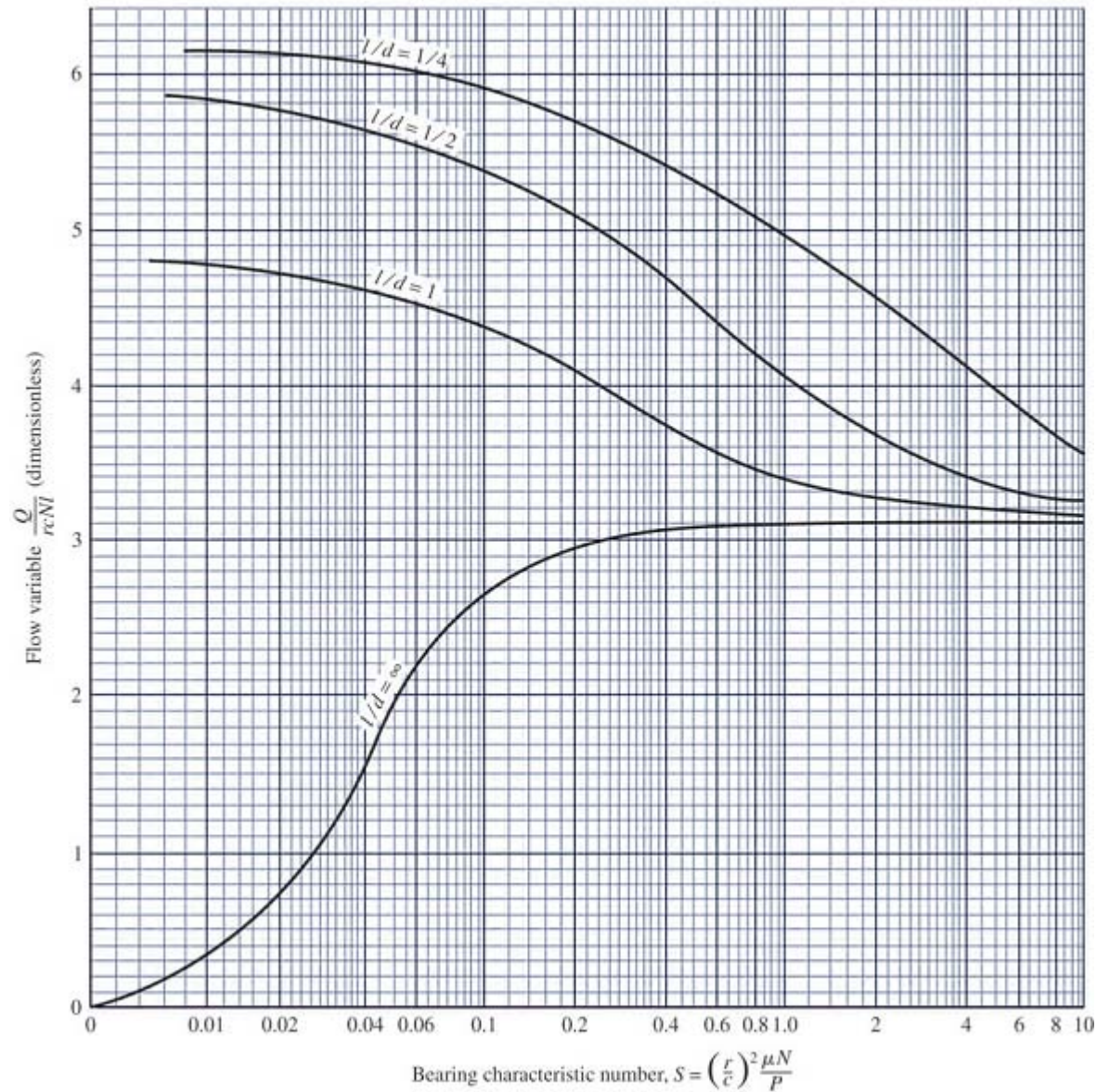




# RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS

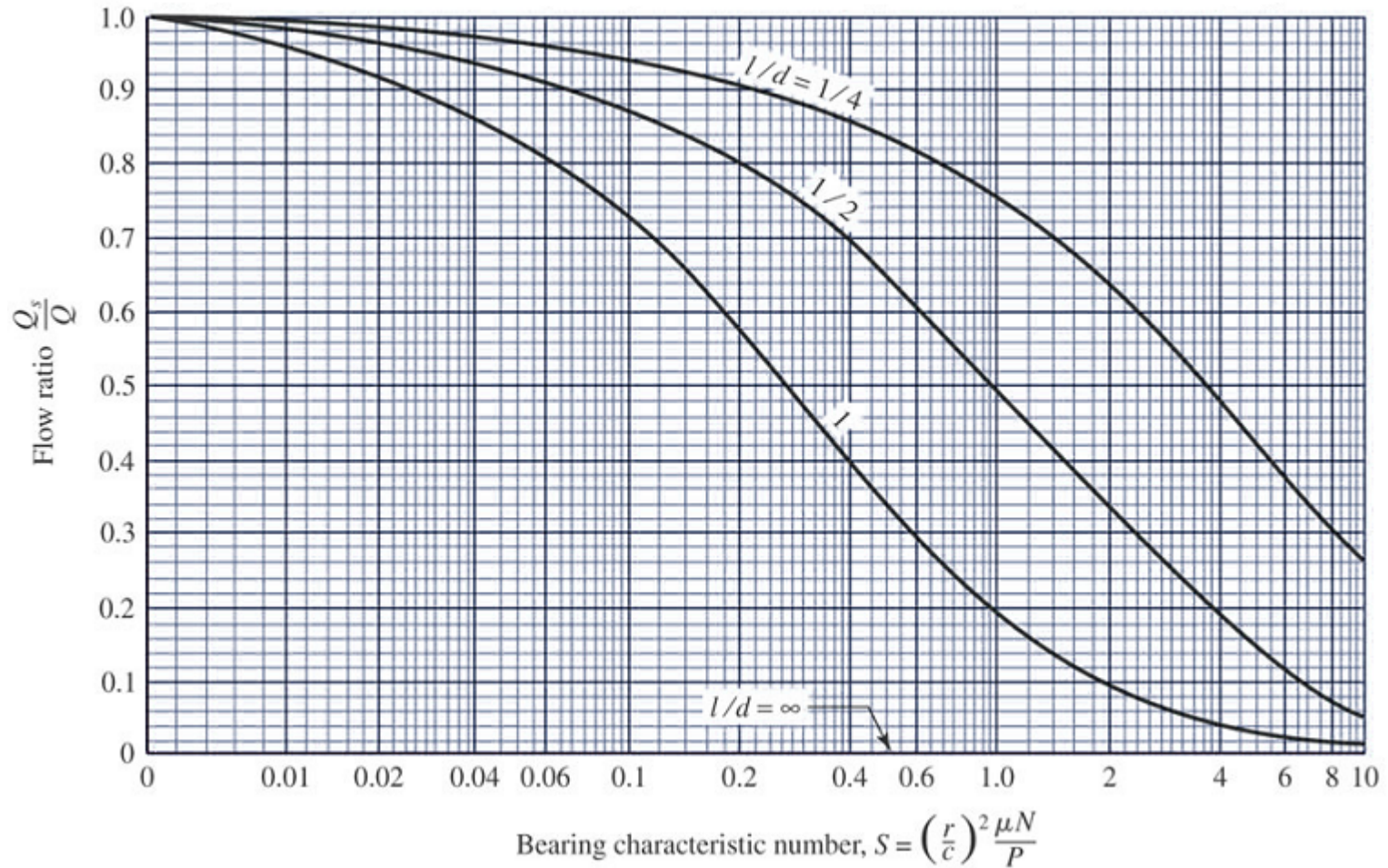


# RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS





# RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS



# 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:

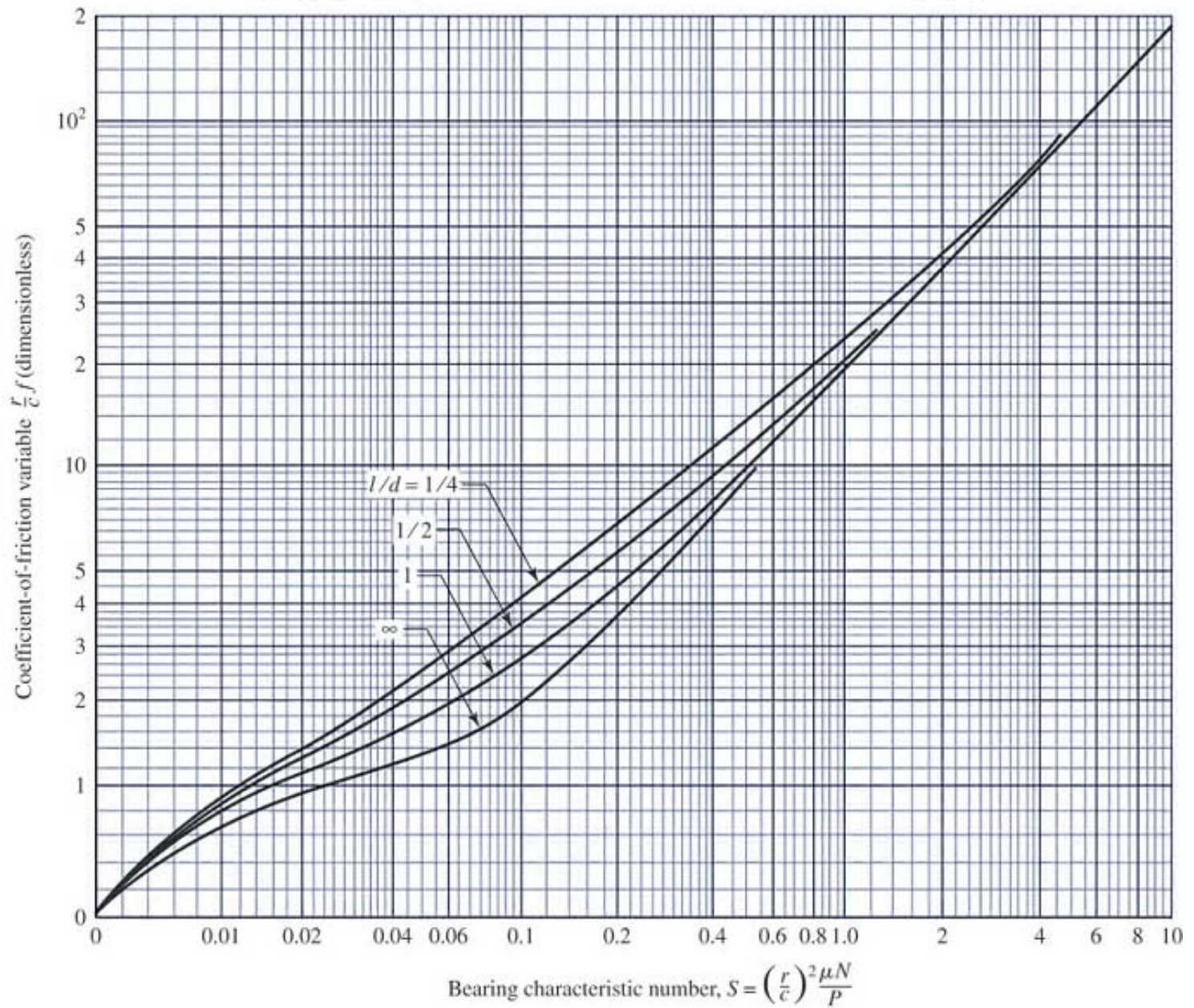
$$P = \frac{W}{2rl} = \frac{2224 \text{ N}}{2 \cdot 0,019\text{m} \cdot 0,0381\text{m}} = 1,534 \text{ MPa}$$

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

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



# EXEMPLO



# 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.

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

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

# REFERÊNCIAS

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