

# **SEM 0327– Elementos de Máquinas II**

## **Aula 12 - Mancais de Deslizamento com regime de lubrificação limítrofe**

**Profa. Zilda de C. Silveira**

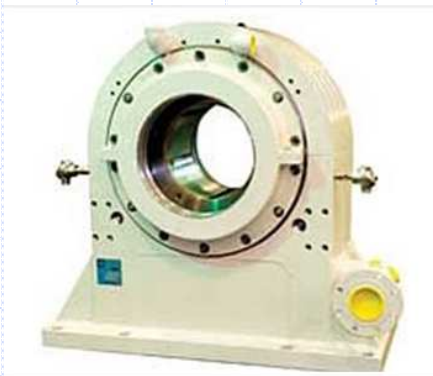
São Carlos, maio de 2019.

# 1. Mancais: função de projeto

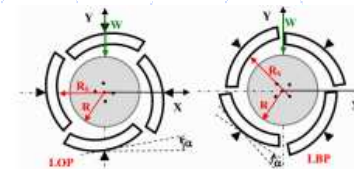
- **Prover movimento relativo** entre dois duas superfícies (e.g. par tribológico mancal-eixo).
- ✓ **Absorver mínimo de potência, com menor desgaste superficial.**

## Mancais de deslizamento

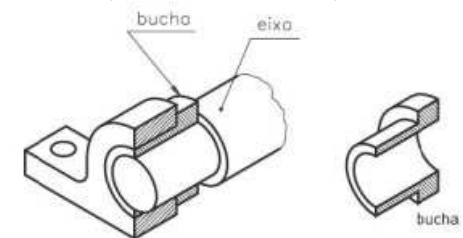
- **Munhão (ou de luva):** cilíndricos (suportam cargas radiais).
- **Axiais (ou de encosto):** planos (suportam cargas axiais).



Desenho esquemático de um mancal trilobulado. Fonte: MACHADO, 2006, p.18.



As condições de operação de um mancal segmentado. Fonte: DANIEL, 2012, p.30.



# 1.2 Exemplos de mancais de deslizamento

## Variação de mancais de deslizamento

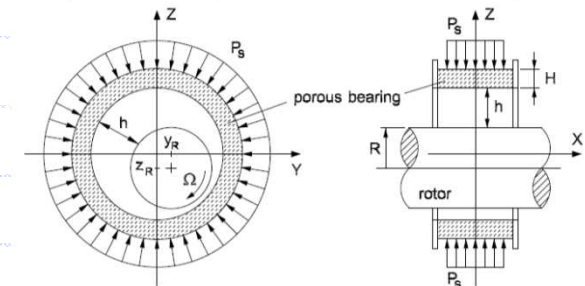
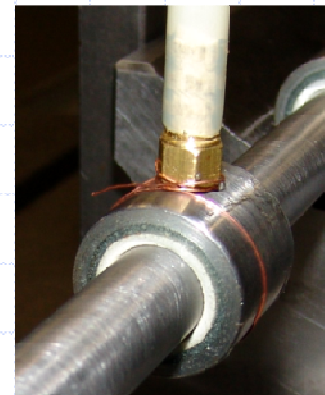
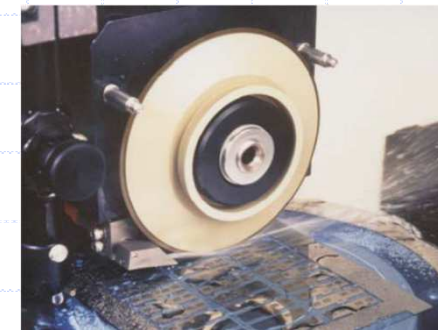
- Mancais de deslizamento seco
- Mancais de deslizamento com lubrificação limite;
- Mancais hidrodinâmicos
- Mancais hidrostáticos



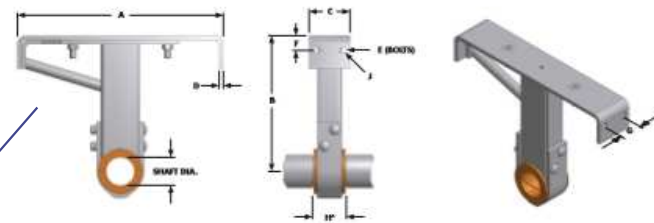
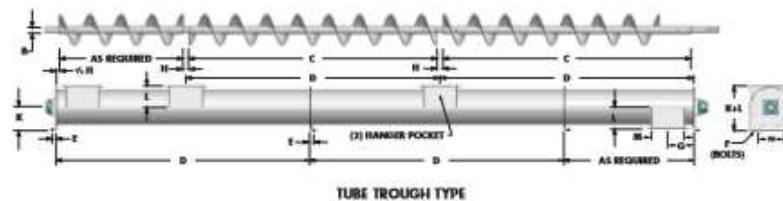
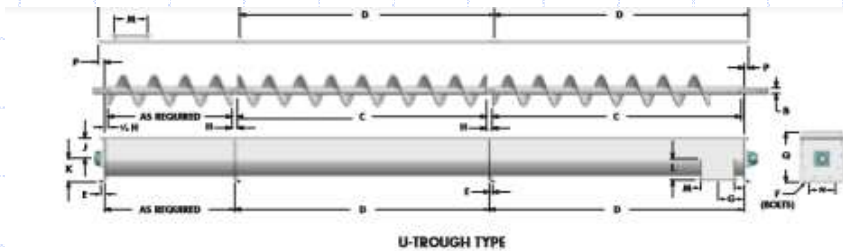
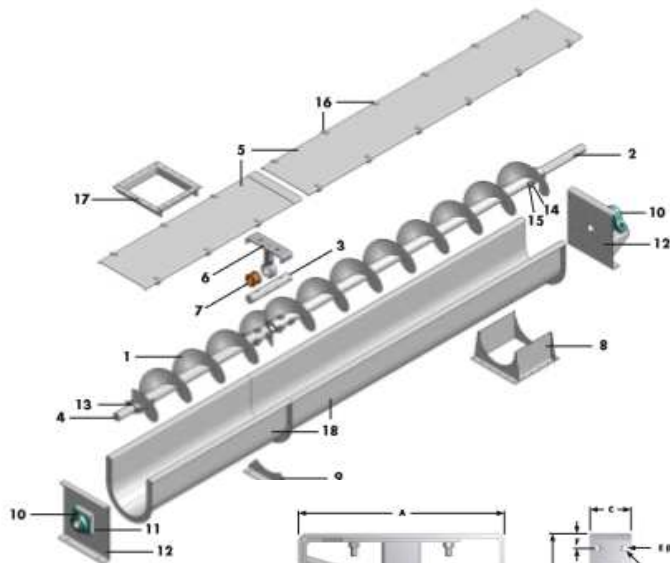
Tipos de sulcos para buchas de mancais de deslizamento (Bunting Bearings Corp. Holland, OH *apud* Mott 2013)



Fonte: Tapia (2002); Silveira (2003).



# 1.2 Exemplos de mancais de deslizamento



Dispositivo de suspensão (Hanger)

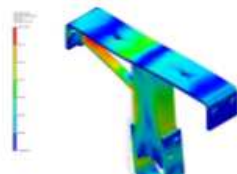
SIZE	SHAFT DIA.	PART #	A	B	C	D	BOLTS	E	F	G	H*	SLOT J	WEIGHT
12	3	BACH122283	13	7.81	5	5/8	3/8	1.31	2.31	3	3/8 x 1	22.3	
14	3	BACH142283	15	9.36	5	5/8	3/8	1.31	2.31	3	3/8 x 1	25.7	
16	3	BACH162283	17	10.91	5	5/8	3/8	1.31	2.31	3	3/8 x 1	29.4	
18	3	BACH182283	19	12.46	5	5/8	3/8	1.31	2.31	3	3/8 x 1	37.5	
18	3 1/2	BACH182263716	19	12.54	5	5/8	3/8	1.31	2.31	4	1/2 x 1	46.6	
20	3	BACH202283	21	13.96	5	5/8	3/8	1.31	2.31	3	3/8 x 1	43.1	
20	3 1/2	BACH202263716	21	13.96	5	5/8	3/8	1.31	2.31	4	1/2 x 1	50.4	
24	3 1/2	BACH242263716	25	16.56	5	5/8	3/8	1.31	2.31	4	1/2 x 1	58.8	
24	3 3/4	BACH2422631516	25	16.56	5	5/8	3/8	1.31	2.31	4	1/2 x 1	62.5	
30	3 1/2	BACH302263716	31	19.36	6	5/8	3/8	1.31	2.31	4	1/2 x 1	80.4	
30	3 3/4	BACH3022631516	31	19.36	6	5/8	3/8	1.31	2.31	4	1/2 x 1	89.1	
35	3 3/4	BACH3522631516	37	23.31	8	5/8	3/8	2.31	5	4	3/4 x 1 3/4	149.2	
35	4 1/2	BACH352264716	37	23.31	8	5/8	3/8	2.31	5	5	5	158.0	

\* H dimension is the space between screws allowed for hanger bearings. The bearing length will always be less than this dimension (see 0.70).  
 Note: Unlike some heavy-duty hangers, the Strong-Arm series uses the common (off-the-shelf) CBX style bearings that are available in many materials.  
 Contact Conveyor Eng. & Mfg. for larger sizes.

### NEW DESIGNS & FEA ANALYSIS

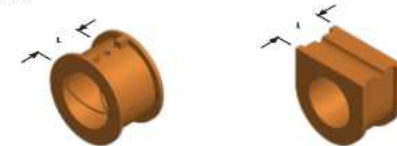
As with our Strong-Arm Quick-Switch™ hanger, all new designs must first pass a thorough FEA analysis before entering the in-service test phase. We would like to thank our long term customers that have worked with us over the years to test new components in real world, difficult applications.

Most, if not all other screw conveyor manufacturers design components to be constructed with carbon steel. Conveyor Eng. & Mfg. may be the only manufacturer that designs components primarily for stainless steel construction and the important material property differences involved.



### HANGERS

#### HANGER BEARINGS



CBX (fits 220 & 226 style hangers)

CB (fits 216 & 230 style hangers)

SHAFT DIA.	PART NUMBER	PART NUMBER	NOMINAL BORE	"L" LENGTH THROUGH BORE**
1 1/2	CBX112**	CB112**	1.805	1.5"
2	CBX2**	CB2**	2.007	1.5"
2 1/2	CBX2716**	CB2716**	2.465	2.3"
3	CBX3**	CB3**	3.010	2.3"
3 1/2	CBX3716**	CB3716**	3.448	3.3"
3 3/4	CBX31516**	CB31516**	3.948	3.3"
4	CBX4716**	-	4.448	4.9"
4 1/2	CBX41516**	-	4.948	4.9"

\* Material Types: BBT: Babbitt BR: Bronze BRG: Bronze w/graphite plugs CER: Ceramic ER: Enstyte GR: Granite H: Hard Iron MEL: Melamine NY: Nylon PH: Plastic Resin RY: Ruxtorc SYN: Synthene UHMW: UHMW  
 UIC: Ustiana VLD: Wood  
 \*\* Nominal bore length shown. Some types (specifically ceramic) are often slightly longer. See "H" dimension on previous pages to determine clearance.

#### HANGER BEARING SELECTION

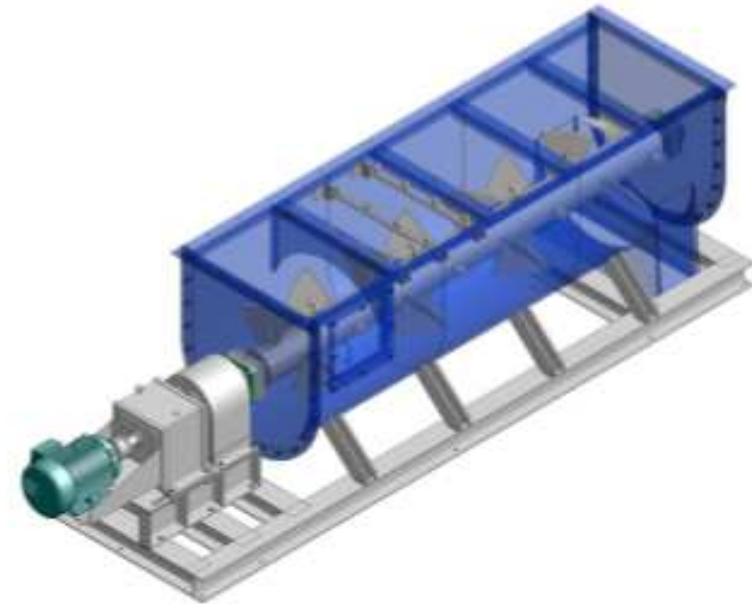
BEARING MATERIAL	AVAILABLE STYLES	MAX. OPERATING TEMP (F)	FDA APPROVED	LUBE	SUGGESTED USES	COMMENTS
Babbitt	CBX, CB	130	No	Self	Grain, Feed, Processing	
Bronze	CBX	200-600**	No	Optional	Grain, Feed, Processing	High quality and load capacity
Brz. w/Graph. plugs	CBX	200-600**	No	Optional	Grain, Feed, Processing	Backup lube protection
Ceramic	CBX	1000	-	Optional	Chemical, Cement	very long life
Enstyte	CBX	310	Yes	Optional	Food Processing	Recommended for sugar
Granite	CBX	700	No	Self	Grain, Feed, Processing	



# A. Mancais de elementos rolantes (estrutura de apoio)



	<p><b>FLANGE MOUNTED BALL BEARING:</b> Primarily designed for radial loading. It can handle only a minimal amount of thrust but does allow for expansion so it is typically located at the tail end of a conveyor.</p>
	<p><b>FLANGE MOUNTED ROLLER BEARING:</b> Primarily designed for combined thrust and radial loading. It does not allow for expansion and is typically located at the drive end of a conveyor.</p>
	<p><b>PILLOW BLOCK BALL BEARING:</b> Primarily designed for radial loading. This style is useful for bearing isolation to avoid temperature extremes and contamination from conveyed products. Typically located at the tail end.</p>
	<p><b>PILLOW BLOCK ROLLER BEARING:</b> Primarily designed for combined thrust and radial loading. This style is useful for bearing isolation to avoid temperature extremes and contamination from conveyed products. Typically located at the drive end.</p>
	<p><b>FLANGE MOUNTED SPHERICAL ROLLER BEARING:</b> Designed to allow for expansion like ball bearings but available in larger sizes. Typically located at the tail end of larger conveyors.</p>
	<p><b>PILLOW BLOCK SPHERICAL ROLLER BEARING:</b> Same as flange mounted version but provides bearing isolation to avoid temperature extremes and contamination from conveyed products.</p>



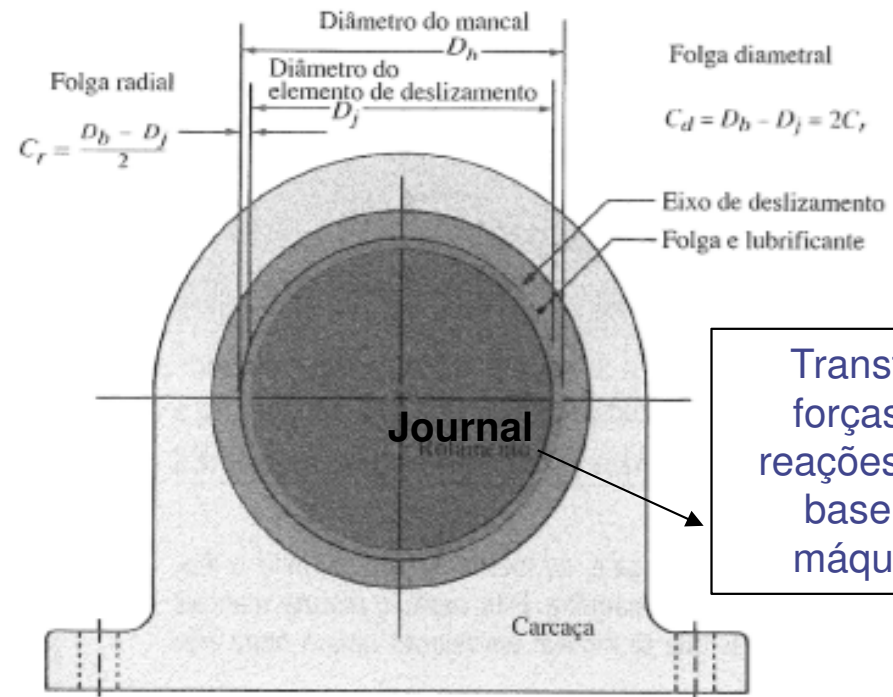
# 1.3 Parâmetros de projeto para mancais cilíndricos de deslizamento

## Requisitos do mancal de deslizamento

- Magnitude, direção e grau de variação da carga radial (axial, se houver)
- Velocidade angular do eixo (rolamento)
- Frequências de partidas e paradas, e duração das pausas
- Magnitude da carga : sistema estacionário e em operação
- Expectativa de vida útil do mancal
- Condições ambientais

## Decisões de projeto

- Escolha dos pares de materiais
- Geometria (diâmetros e tolerâncias)
- Valor nominal e folga do mancal de deslizamento
- Acabamento superficial da superfície do mancal/eixo e método de fabricação
- Comprimento do mancal;
- Tipo de lubrificação: lubrificante e modo de aplicação
- Temperatura de operação do sistema do mancal e do lubrificante
- Método de filtragem do lubrificante e manutenção da temperatura de trabalho.



## Análises

- Tipo de lubrificação: camada limite (marginal); película mista ou completa
- **Coefficiente de atrito**
- **Espessura mínima da película**
- Perda de energia por atrito
- Expansão térmica
- Dissipação de calor
- **Rigidez e inclinação do eixo de rolamento.**

## 2. Lubrificantes

- **Lubrificante:** funções de projeto = reduzir atrito e dissipar calor.

Estado: gasoso, líquido e sólido.

Líquidos e sólidos: propriedades de baixa resistência ao cisalhamento e alta resistência a compressão.

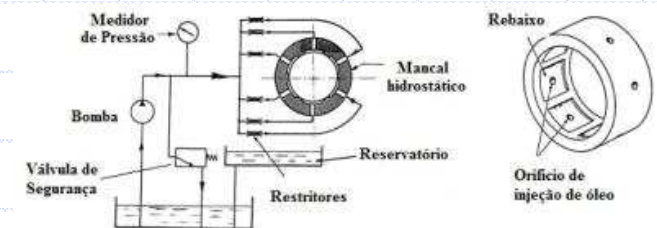
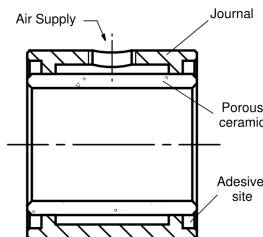
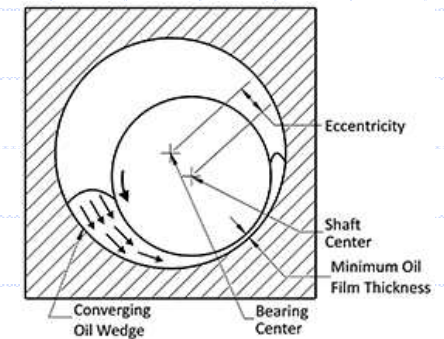
- Os lubrificantes podem atuar como contaminantes na superfície metálica e revesti-las com monocamadas de moléculas que inibem a adesão até mesmo de metais compatíveis (e.g. lubrificante EP).
- **Lubrificantes Líquidos:** são principalmente baseados no petróleo ou óleos sintéticos, embora a água e o ar sejam, às vezes, possam ser utilizados como fluido separador.
- **Lubrificantes de Filme Sólido** (Dois tipos):
  - a) Materiais que exibem tensões de cisalhamento baixas, tais como o grafite e o dissulfeto de molibdênio, que são adicionados à interface dos componentes móvel e estacionário,
  - b) Lubrificantes de camada tais como fosfato, óxidos ou sulfetos, que são depositados nas superfícies dos componentes.

# 2.1 Sistemas de lubrificação

Método de suprimento do lubrificante à superfície de deslizamento:

- Sua distribuição e seu escoamento (extremidades) dentro da área de deslizamento (uso de bombas – da própria máquina) – engrenagem em banho, copo de óleo por gravidade,...
- Quantidade de calor gerada no mancal e seu efeito sobre a temperatura do lubrificante;
- Dissipação do calor no mancal – uso de trocadores de calor.
- Manutenção do filme de óleo (filtragem, troca) – filtros coalescentes, sistemas magnéticos,...
- Condições ambientais.

○ Fornecimento do lubrificante ao deslizamento deve ser feito sempre em uma área oposta ao local de pressão hidrodinâmica que sustenta a carga. (ranhuras -“pockets”)





## 2.2 Viscosidade

- A **Viscosidade** ( $\eta$ ) é uma medida da resistência de um fluido ao cisalhamento.
  - ✓ Varia **inversamente com a temperatura** e **diretamente com a pressão**, de uma maneira não-linear. Pode ser expressa como viscosidade absoluta  $\eta$ , ou viscosidade cinemática  $\nu$ , as quais estão relacionadas pela densidade de massa do fluido:

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad (1)$$

Sendo  $\rho$ : a densidade de massa do fluido.

As unidades da viscosidade absoluta ( $\eta$ ) são **lb.s/in<sup>2</sup>** (reyn) no sistema inglês e **Pa.s** no sistema SI.

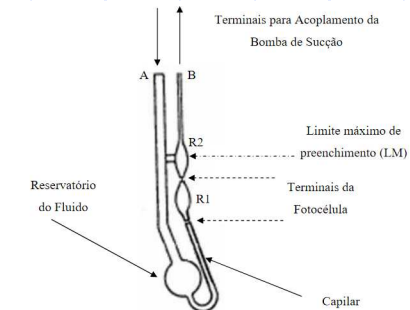
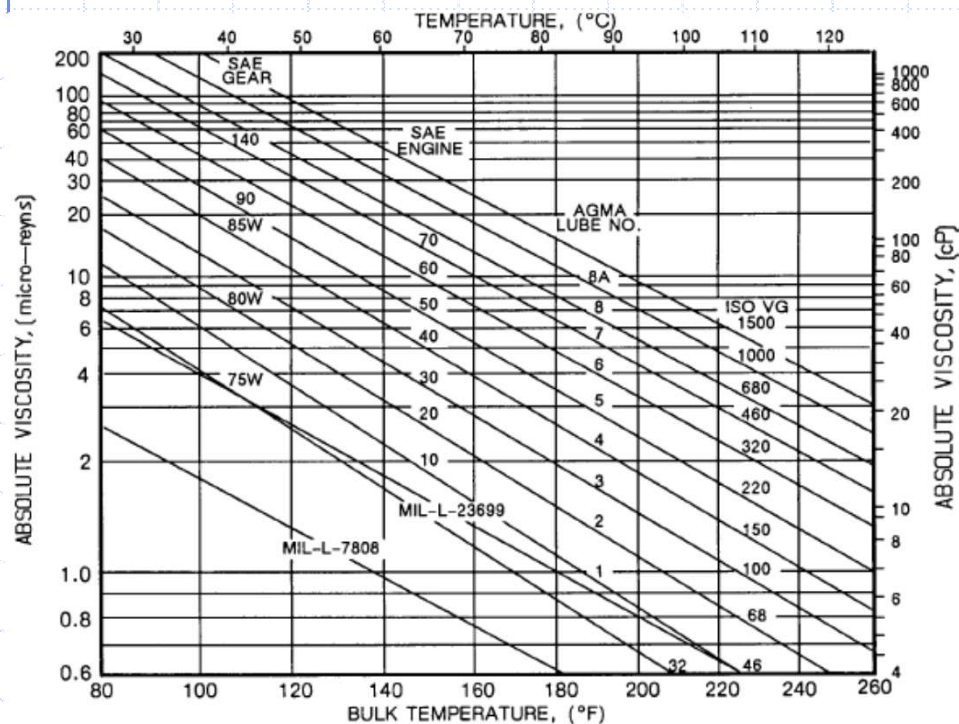
As unidades SI da viscosidade cinemática ( $\nu$ ) são **cm<sup>2</sup>/s** (Stoke), e as unidades inglesas são **in<sup>2</sup>/s**.

- **Obtenção da viscosidade cinemática:**
  - Sistema capilar (mede taxa de fluxo do fluido em faixa de temperatura de 40 a 100°C);
  - Sistema rotacional (mede torque e a velocidade de rotação de um eixo vertical ou cone girando dentro de um mancal –concêntrico - preenchido com o fluido em temperatura de teste.

## 2.2 Viscosidade

- Obtenção da viscosidade absoluta (para estimativa de campos de pressões e fluxos na folga do mancal).
  - Obtida a partir da viscosidade cinemática e densidade do fluido à temperatura de teste, pela equação (1).

Gráfico de fabricante: Viscosidade Absoluta x Temperatura (Óleos Lubrificantes a base de petróleo - ISO). Designação SAE em escalas de óleos para motor e óleos de engrenagens.



Esquema do Viscosímetro Capilar. Fonte: UFU



Esquema do Viscosímetro Rotacional. Fonte: <https://www.braseq.com.br/viscosimetro-rotacional-brookfield>

## 2.3 Materiais para mancais de deslizamento

- ❖ **Par de materiais:** material estrutural e material de apoio (com menor resistência mecânica\*)
- **Eixo** normalmente fabricado com aço (1020, 4340, 8620,...)
- **Superfície de deslizamento (bucha, *journal*):** elemento estacionário pode ser feito com diferentes materiais metálicos e não metálicos.
  - **Propriedades requeridas para os materiais de mancais de deslizamento com lubrificação de camada limite:**
    - **Resistência estática e à fadiga** (transmissão da carga aplicada entre elementos do mancal à estrutura)
    - **Incorporabilidade (*Embeddability*):** Propriedade de incorporabilidade, que permite que o material do mancal “absorva” partículas externas, sem danificar a área de contato. Materiais dúcteis (“Soft”)
    - **Resistência à corrosão** (temperatura, lubrificante e partículas em suspensão)
    - **Custo** (material + instalação + manutenção\*)

## 2.3 Materiais para mancais de deslizamento

- **Bronze fundido:** Diversas ligas de cobre com estanho, chumbo, zinco ou alumínio.

Boa propriedade de incorporabilidade, mas possui baixa resistência. *Aplicações: bombas, máquinas operatrizes e mecanismos.*

- **Metal patente (*Babbitt*):** Possuem base de chumbo ou estanho, com 80% de metal patente. Composições de liga de cobre e antimônio (bem como chumbo e estanho) podem ajustar as propriedades para atender aplicações específicas.

Boa capacidade de conformação: ótima capacidade de incorporabilidade e resistência à emperramento (propriedades importante para lubrificação de camada limite). Possui baixa resistência mecânica. *Aplicações: revestimento de carcaças de aço ou FoFo.*

- **Alumínio:** Possui a maior resistência mecânica dos materiais utilizados em mancais de deslizamento. A dureza elevada implica em baixa propriedade de incorporabilidade, exigindo lubrificantes puros. *Aplicações severas: motores, bombas e aeronaves.*
- **Zinco:** Usado quando não há lubrificação contínua de lubrificante (mas, operam melhor com lubrificação contínua). Graxas próprias para eixos de deslizamento.

Em mancais feito de aço, uma película fina do material é transferida ao aço, para proteger quanto ao desgaste e corrosão. O uso não é indicado para ambientes úmidos.



## 2.3 Materiais para mancais de deslizamento

- **Metais porosos:** Sinterizados a partir de bronze, ferro e alumínio (algumas vezes misturados com chumbo ou cobre).

A porosidade, permite propriedade de permeabilidade à superfície de deslizamento, com aplicações em movimentos lentos, alternativos e oscilatórios.

- **Plásticos de engenharia:** normalmente são materiais auto lubrificantes, tendo baixo coeficiente de atrito (0,05 a 0,15).

Podem operar a seco, mas a presença de um lubrificante sempre melhora as condições de deslizamento.

- Boa propriedade de incorporabilidade e resistência à emperramento, mas com baixa resistência mecânica, condição que limite o valor da carga (Reforços com luvas metálicas, para melhorar a resistência).
- Vantagens: boa resistência à corrosão, e operando à seco, baixa probabilidade de contaminação.

Aplicações: equipamentos de processamento de alimentos e produtos químicos.

**PTFE (Politetrafluoretileno); PA (Poliamida); PEEK (Polieterecetonas)... (fillers e reforços: fibras de vidro e de carbono, pós de bronze, grafite, dissulfeto de molibdênio.**

## 2.3 Materiais para mancais de deslizamento

**Table 12-5**

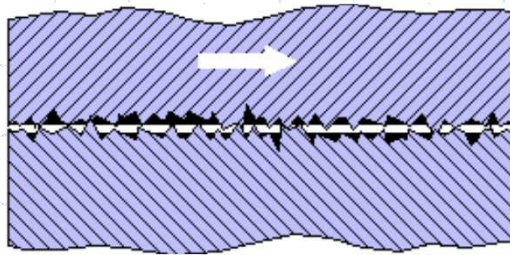
Range of Unit Loads in  
Current Use for Sleeve  
Bearings

Application	Unit Load	
	psi	MPa
Diesel engines:		
Main bearings	900–1700	6–12
Crankpin	1150–2300	8–15
Wristpin	2000–2300	14–15
Electric motors	120–250	0.8–1.5
Steam turbines	120–250	0.8–1.5
Gear reducers	120–250	0.8–1.5
Automotive engines:		
Main bearings	600–750	4–5
Crankpin	1700–2300	10–15
Air compressors:		
Main bearings	140–280	1–2
Crankpin	280–500	2–4
Centrifugal pumps	100–180	0.6–1.2

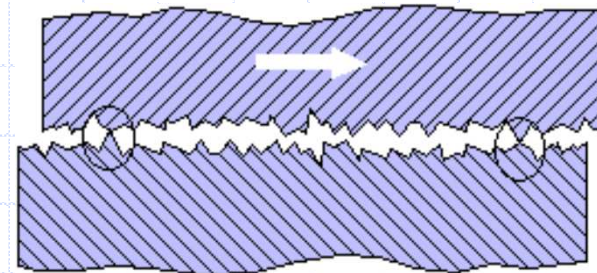
Fonte: Shigley (2008)

## 2.4 Regimes de lubrificação

- Classificação: grau com que o lubrificante/folgas separam as superfícies em deslizamento relativo.



Camada limite (Limítrofe) : coeficiente de atrito 0,05 a 0,20.

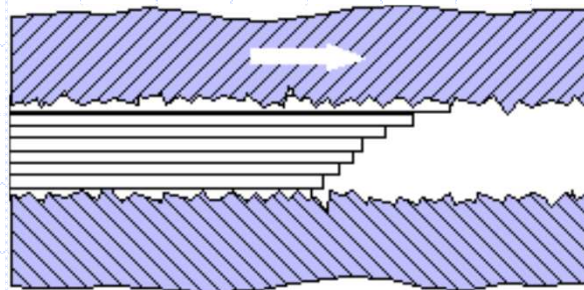


Lubrificação de película mista : coeficiente de atrito 0,04 a 0,10.

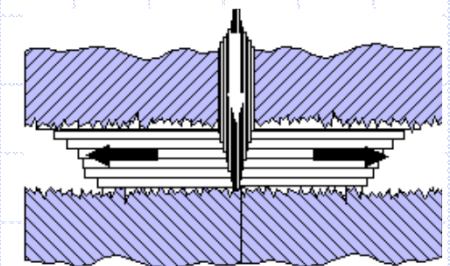


Rolamento e deslizamento

EHD



Lubrificação de película completa (Hidrodinâmica) : coeficiente de atrito 0,002 a 0,04



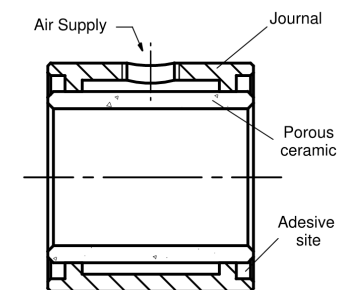
Hidrostática

## 2.1 Sistemas de lubrificação

Método de suprimento do lubrificante à superfície de deslizamento:

- Sua distribuição e seu escoamento (extremidades) dentro da área de deslizamento (uso de bombas – da própria máquina) – engrenagem em banho, copo de óleo por gravidade,...
- Quantidade de calor gerada no mancal e seu efeito sobre a temperatura do lubrificante;
- Dissipação do calor no mancal – uso de trocadores de calor.
- Manutenção do filme de óleo (filtragem, troca) – filtros coalescentes, sistemas magnéticos,...
- Condições ambientais.

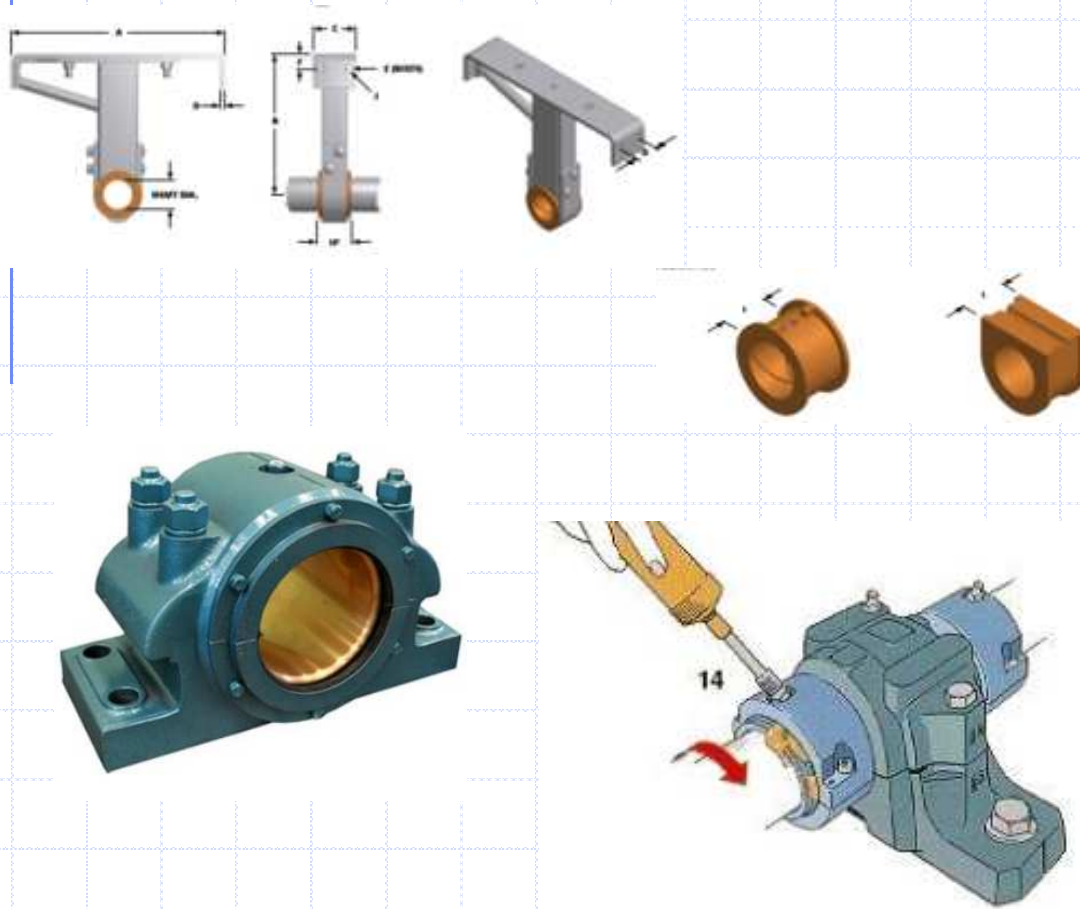
✓ Fornecimento do lubrificante ao deslizamento deve ser feito sempre em uma área oposta ao local de pressão hidrodinâmica que sustenta a carga. (ranhuras -“pockets”)





## 4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento de lubrificação com camada limite

- **Geometria:** cilindro liso e vazado, no qual o eixo gira (oscila, desliza) com velocidade angular baixa de modo linear.



### Parâmetros de projeto

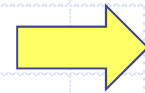
- **Coeficiente de atrito ( $f$ )** (condições de partida e operação)
- **Capacidade de carga ( $p$ ):** - Carga radial atuando sobre a superfície de deslizamento
- **Velocidade de operação ( $V$ ):** velocidade relativa entre os componentes girante e estacionário
- **Temperatura em condições operacionais**
- **Limitações de desgaste**
- **Manufatura** (conformação, usinagem, fixação, montagem e manutenção).
- Relação  $L \times D$

- **Fator  $pV$**

## 4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento de lubrificação com camada limite (Parâmetro de deslizamento)

- ✓ Mudança de regime (desgaste) de lubrificação altera significativamente o coeficiente de atrito do elemento móvel e do estacionário.

Parâmetro de deslizamento



$$\frac{\mu N}{p} \quad [.]$$

$\mu$ : viscosidade do lubrificante (absoluta)

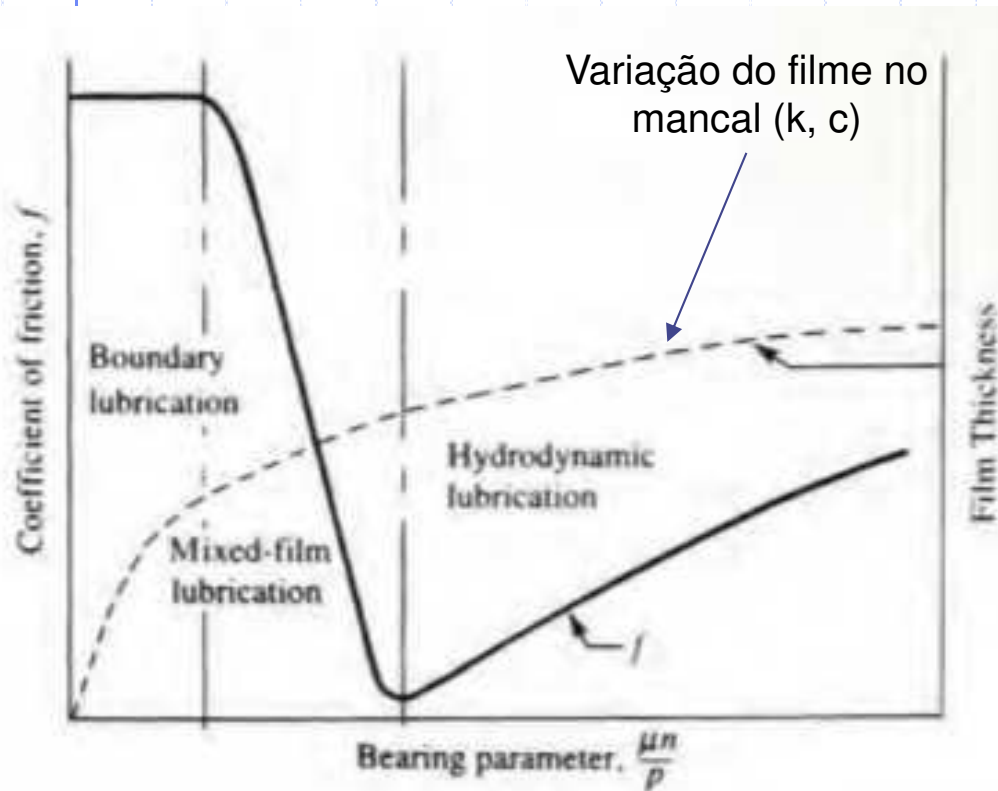
$N$ : velocidade de rotação do eixo

$P$  = pressão na superfície do mancal ( $F_R/LD$ )

<i>Unit System</i>	<i>Viscosity, <math>\mu</math></i>	<i>Rotational Speed, <math>n</math></i>	<i>Pressure, <math>p</math></i>
SI metric	N·s/m <sup>2</sup> or Pa·s	rev/s	N/m <sup>2</sup> or Pa
English	lb·s/in <sup>2</sup> or reyn	rev/s	lb/in <sup>2</sup>
Old metric (obsolete)	dyne·s/cm <sup>2</sup> or poise	rev/s	dynes/cm <sup>2</sup>

## 4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento de lubrificação com camada limite (Parâmetro de deslizamento)

- ✓ A curva de Stribeck apresenta os diferentes regimes de lubrificação, em função do parâmetro de deslizamento e o coeficiente de atrito ( $f$ ) das superfícies de deslizamento em contato.



Observe: Para **baixos valores** de

$\frac{\mu n}{p}$  ocorre a **lubrificação de camada**

**limite**, com coeficiente de atrito ( $f$ ) elevado – 0,08 a 0,14). Exemplo: eixo fabricado com aço, com baixa rotação sobre uma mancal de bronze.

**Elevados valores** de  $\frac{\mu n}{p}$

Implica em **lubrificação com filme completo**, com **baixo ( $f$ ):** 0,008 a 0,02.

Figura 1 - Curva de Stribeck

## 4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento de lubrificação com camada limite (Parâmetro de deslizamento)

- Lubrificação com camada limite (*Boundary lubrication*): velocidades baixas (0,05 m/s).

\* Movimentos oscilatórios com lubrificantes com baixa viscosidade e elevada pressão pode produzir lubrificação do tipo camada limite.

- Lubrificação hidrodinâmica: Velocidades contínuas em uma direção acima de 0,13 m/s).

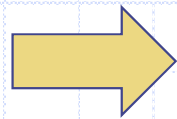
✓ Lubrificação de película completa: menores cargas, velocidade de rotação elevada entre os elementos rotativos e estacionários e lubrificante com maior viscosidade, com fluxo abundante na região de contato.



## 4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento de lubrificação com camada limite (Parâmetro de deslizamento)

➤ **Fator de desempenho ( $pV$ ):** capacidade do material absorver a energia gerada pelo atrito, na superfície de deslizamento.

➤ Sendo:  $p$  (capacidade de carga) e  $V$  (velocidade de operação)



Importante parâmetro para mancais de deslizamento com lubrificação limítrofe.

➤ No valor limite de  $pV$ , o mancal não atinge uma faixa estável de temperatura, levando a uma falha catastrófica.

➤ Valores práticos  $pV/2$  fornecido por fabricantes de materiais.

## 4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento de lubrificação com camada limite

**TABLE 16-1** Typical performance parameters for bearing materials in boundary lubrication at room temperature

Material	$pV$		
	psi-fpm	kPa-m/s	
Vespel® SP-21 polyimide	300 000	10 500	Trademark of DuPont Co.
Manganese bronze (C86200)	150 000	5250	Also called SAE 430A
Aluminum bronze (C95200)	125 000	4375	Also called SAE 68A
Leaded tin bronze (C93200)	75 000	2625	Also called SAE 660
KU dry lubricant bearing	51 000	1785	See note 1
Porous bronze/oil impregnated	50 000	1750	
Babbitt: high tin content (89%)	30 000	1050	
Rulon® PTFE: M-liner	25 000	875	Metal backed
Rulon® PTFE: FCJ	20 000	700	Oscillatory and linear motion
Babbitt: low tin content (10%)	18 000	630	
Graphite/Metallized	15 000	525	Graphite Metallizing Corp.
Rulon® PTFE: 641	10 000	350	Food and drug applications (see note 2)
Rulon® PTFE: J	7500	263	Filled PTFE
Polyurethane: UHMW	4000	140	Ultra high molecular weight
Nylon® 101	3000	105	Trademark of DuPont Co.

Source: Bunting Bearings Corp., Holland, OH

<sup>1</sup>KU Bearings consist of bonded layers of a steel backing and a porous bronze matrix overlaid with PTFE/lead bearing material. A film from the bearing material is transferred to the journal during operation.

<sup>2</sup>Rulon® is a registered trademark of Saint-Gobain Performance Plastics Company. Bearings are made from Rulon® PTFE (polytetrafluoroethylene) material in a variety of formulations and physical constructions.

## 4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento de lubrificação com camada limite

### ➤ Parâmetro pV (Sistema Unificado)

$$p = F / LD = lb / pol^2 = psi$$

$$V = \frac{\pi D n}{12} = ft / min = fpm$$

$$pV = (lb / pol^2)(ft / min) = psi \cdot fpm$$

ou reorganizando

$$pV = \underbrace{(ft \cdot lb / min)}_{\text{Unidade de transferência de potência ou energia por unidade de tempo}} / \underbrace{pol^2}_{\text{Área}}$$



pV = Taxa de entrada de energia no mancal por unidade de área projetada (com f = 1,0)

Unidade de transferência de potência ou energia por unidade de tempo

## 4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento de lubrificação com camada limite

### ➤ Parâmetro pV (Sistema Internacional)

$$p = F / LD = N / mm^2 = MPa$$

$$V (\text{Velocidade linear do eixo}) = \frac{\pi D n}{60000} = m / s$$

Assim:

$$pV = (MPa)(m / s)$$

Convertendo para o Sistema Unificado

$$1,0 \text{ psi.fpm} = 3,50 \times 10^{-5} \text{ MPa.m/s}$$

Assim,

$$pV = \text{MPa.m/s} = \frac{10^6 \text{ N}}{m^2} \frac{m}{s} = \frac{10^6 \text{ W}}{m^2}$$

$$1W = 1N.m / s$$

## 4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento de lubrificação com camada limite

### ➤ Temperatura de operação

- Plásticos (até 200°C); PTFE (260°C), Metal patente (150 °C); Carbono-grafite (400°C)

**\* Estimativas iniciais para espessura mínima/temperatura máxima (Shigley, 2016)**

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

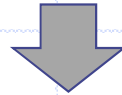
$$\underline{T_{\max} \text{ óleo}^* \leq 250^\circ\text{F} (\pm 121^\circ\text{C})}$$



## 4.1 Procedimento para se pré-dimensionar um mancal de deslizamento (bucha) com lubrificação limítrofe

**Dados de entrada:** carga radial no mancal ( $F_r$ ); Velocidade de rotação ( $n$ ); diâmetro nominal mínimo do eixo ( $D_{min}$ )\* (critério de tensão e deflexão).

**Objetivo do procedimento:** Especificar o eixo de deslizamento, seu diâmetro e comprimento e selecionar um material com parâmetro  $pV$  seguro.



- ✓ Especificar um diâmetro experimental, para o mancal e eixo (proporção);
- ✓ Especificar uma relação  **$L \times D$  (0,5 a 2,0)**. Para mancais porosos sem lubrificação ou com óleo impregnado adotar  $L/D = 1$ .
- ✓ Calcular  $L = D(L/D)$  comprimento nominal do eixo
- ✓ Calcular a pressão do eixo ( $p = F_r/LD$ )
- ✓ Calcular a velocidade linear ( $V$ ) da superfície do eixo de deslizamento.
- ✓ Calcular o parâmetro  $pV$
- ✓ Multiplicar  $\times 2$  ( $pV$ ) Análogo à um coeficiente de segurança.
- ✓ Especificar um material por tabelas de fabricantes (Tab. 16-1).
- ✓ Concluir o projeto do sistema “mancal”, escolhendo a folga diametral, seleção e fornecimento do lubrificante, especificação do acabamento superficial, controle térmico e montagem.



## 5. Exemplo de pré-dimensionamento

- Um mancal de deslizamento deve ser projetado para sustentar uma carga radial de 150 lb. Considerando um eixo com Diâmetro Mínimo ( $D_{\min}$ ) de 1,50", que gira a uma rotação de 500 rpm. Projete-o para um regime de lubrificação limítrofe.

### Resolução

1. Escolha um diâmetro:  $D = D_{\min} = 1,50''$
2. Considerando  $L/D = 1,0$ .
  - Assim,  $L = D = 1,50''$ , considerando  $L = D(L/D)$
3. Pressão no eixo:  $F_r/LD = 150 \text{ lb} / 1,5'' \times 1,5'' = \underline{66,7 \text{ psi}}$
4. Velocidade do eixo:  $V = \pi Dn/12 = \pi (1,5'') 500/12 = \underline{196 \text{ ft/min.}}$
5.  $pV = (66,7 \text{ psi}) \cdot (196 \text{ psi}) = 13100 \text{ psi.fpm}$

## 5. Exemplo de pré-dimensionamento

6. Valor de projeto para o parâmetro relacionado com a taxa de calor gerada na superfície ( $pV$ ) = 2 (13100) psi.fpm

$$pV = 26200 \text{ psi.fpm}$$

7. Consultando tabelas de fabricantes (pré-escolha do material mancal/eixo): metal patente (Babbitt), com alto teor de estanho (Valor nominal de  $pV = 30.000$  psi.fpm)

TABLE 16-1 Typical performance parameters for bearing materials in boundary lubrication at room temperature

Material	$pV$		
	psi-fpm	kPa-m/s	
VespeI® SP-21 polyimide	300 000	10 500	Trademark of DuPont Co.
Manganese bronze (C86200)	150 000	5250	Also called SAE 430A
Aluminum bronze (C95200)	125 000	4375	Also called SAE 68A
Leaded tin bronze (C93200)	75 000	2625	Also called SAE 660
KU dry lubricant bearing	51 000	1785	See note 1
Porous bronze/oil impregnated	50 000	1750	
Babbitt: high tin content (89%)	30 000	1050	
Rulon® PTFE: M-liner	25 000	875	Metal backed
Rulon® PTFE: FCJ	20 000	700	Oscillatory and linear motion
Babbitt: low tin content (10%)	18 000	630	
Graphite/Metallized	15 000	525	Graphite Metallizing Corp.
Rulon® PTFE: 641	10 000	350	Food and drug applications (see note 2)
Rulon® PTFE: J	7500	263	Filled PTFE
Polyurethane: UHMW	4000	140	Ultra high molecular weight
Nylon® 101	3000	105	Trademark of DuPont Co.

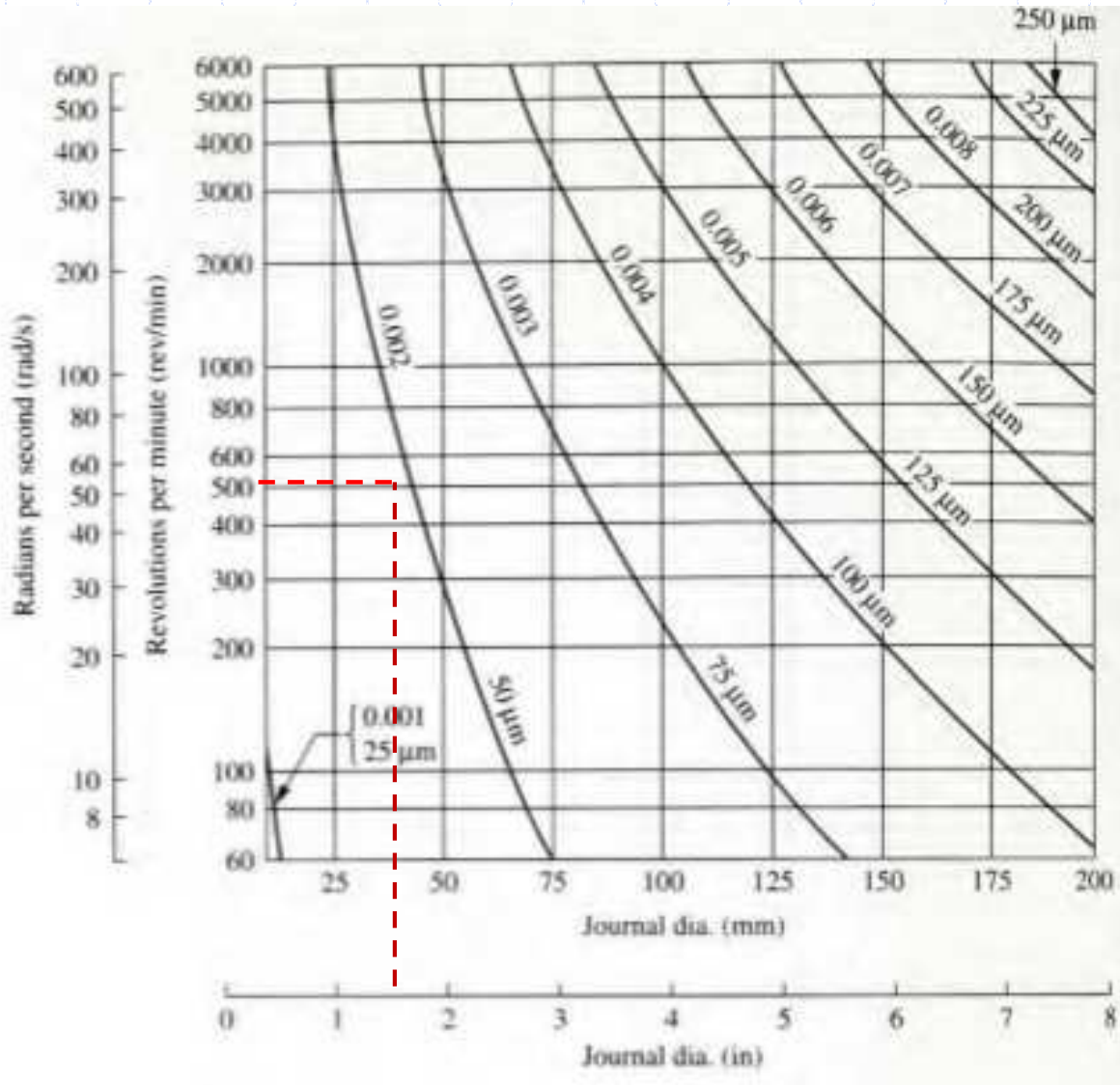
Source: Bunting Bearings Corp., Holland, OH

<sup>1</sup>KU Bearings consist of bonded layers of a steel backing and a porous bronze matrix overlaid with PTFE/lead bearing material. A film from the bearing material is transferred to the journal during operation.

<sup>2</sup>Rulon® is a registered trademark of Saint-Gobain Performance Plastics Company. Bearings are made from Rulon® PTFE (polytetrafluoroethylene) material in a variety of formulations and physical constructions.

# 5. Exemplo de pré-dimensionamento

## 8. Escolha da folga nominal:



➤ Considerando um diâmetro de eixo ( $D_{min} = 1,50''$  e rotação de 500 rpm)



Folga radial nominal ( $C_d$ ) = 50  $\mu m$  ou (0,002)''

Verificar a região do regime de lubrificação na curva de Stribeck!!!



## 5. Exemplo de pré-dimensionamento

9. Escolha de detalhes de projeto: tipo de lubrificante (ver faixa de rotação, material ( $f$ ); fabricação e montagem,...)

## 6. Exercício proposto (mancal de deslizamento com lubrificação limítrofe)

Pré-dimensione e faça um esboço de um mancal de deslizamento com lubrificação limítrofe, para sustentar uma carga radial de 2,50 kN de um eixo, com rotação de 1150 rpm. O diâmetro nominal mínimo do eixo é de 65 mm.

Utilize o Sistema Internacional para as grandezas calculadas.

\* Adote os dados que julgar necessários.

1. Primeira tentativa:  $D_{\min} = D_{\text{experimental}}$  (ou maior)
2. Estime  $L/D$  (0,5 a 2,0) – Mancal fabricado de Metal próximo de 1,5.
3. Pressão, velocidade do rolamento,  $pV$  e folga radial.

.  
. .  
. .  
. .

. \* Analisar valor de  $pV$  (muito elevado, requer lubrificação mais cara e cuidadosa) e verificar regime de lubrificação na curva de Stribeck)

Trocar valor do diâmetro do eixo...recálculo!

## 7. Mancais de deslizamento com regime limítrofe, sob carregamento oscilatório

➤ Nesse caso, o eixo está em condição estática e o mancal gira ao seu redor.

**Exemplos:** Mancais em eixo de direção, pedais de freios de aceleração, reguladores de assento, mecanismos de mudança de marcha, dobradiças de portas, equipamentos para exercícios físicos, camas hospitalares, atuadores cilíndricos hidráulicos.

✓ Definição de um número equivalente de revoluções por minuto, para o movimento do eixo: Definir oscilações em número de ciclos:

$\varphi$  = ângulo de oscilação em uma direção [graus ou rad]

$\eta_0$  = Número de ciclos completos de oscilação em ambas as direções por minuto [ciclos/min];

D = Diâmetro nominal do mancal [“ ou mm]

L = Comprimento do eixo [“ ou mm]

F = Força radial aplicada [lb ou N]

## 7. Mancais de deslizamento com regime limítrofe, sob carregamento oscilatório

$$V_{mov\_continuo} = \frac{\pi D n}{12} [ft / min]$$

$$V_{mov\_oscilatorio} = \frac{\pi D}{12} \left( \frac{\varphi}{2\pi} \right) f$$

$$V_{mov\_oscilatorio} = \frac{\varphi f D}{24} [ft / min]$$

Velocidade  
deslocamento  
oscilatório

**Número equivalente de revoluções/minuto**

$$n_{e_q} = n_o (2\varphi) / 360 \text{ revoluções / minuto equivalentes}$$



ou

$$V = \frac{\pi D n_{eq}}{12} [ft / min]$$

$$V = \frac{\pi D n_{eq}}{60000} [m / min]$$

- Parâmetro pV e outros parâmetros de projeto calculados da mesma forma, que nos mancais de regime limítrofe.

## 8. Exemplo

- O projeto da porta de um forno industrial apresenta uma barra horizontal, com 15 mm de diâmetro acima da abertura, de onde ficará suspensa. Duas dobradiças cilíndricas lisas são revestidas por grafite metalizado, um material de deslizamento listado na Tab. 16.1. A porta pesa 20,40 kN e gira 110° da vertical a 20° acima da horizontal, quando é aberta para a colocação ou retirada de peças a serem aquecidas retornando a posição original. A porta é aberta e fechada cinco vezes por minuto. Determine o comprimento exigido para as dobradiças a fim de produzir um valor de pV, que não ultrapasse 25% do valor limite.

Ângulo de oscilação ( $\varphi$ ) igual a 110°,  $n_0=5,0$  ciclos/min.;  $D_{\min}$  (eixo) = 15 mm.

$F = 10200$  N (para cada dobradiça).  $(pV)_{\text{adm}} = pV_{\text{lim}} \times 0,25 = 0,525 \text{ MPa.m/s} \times (0,25) = 0,1313 \text{ MPa.m/s}$

1) Cálculo do núm. equivalente de rotações:

$$ne_q = n_0(2\varphi) / 360 = (5,0 \text{ ciclos/min.}) \cdot (2) \cdot (110^\circ) / 360^\circ \Rightarrow$$

$$ne_q = 3,06$$

2) Velocidade de deslizamento:

$$V_{\text{mov\_osc}} = \frac{\pi D n_{eq}}{60000} \Rightarrow \frac{\pi(15)3,06}{60000} = 0,00240 \text{ m/s}$$



## 8. Exemplo

3) Pressão limite no eixo de deslizamento:

$$p_{adm} = (pV)_{lim} / V_{mov\_osc} = (0,1313)(0,00240) = 54,69 MPa.m/s$$

4) Sendo:

$p = F / LD$  (para determinar o comprimento do mancal):

$$56,69 = 10200 / L(15) \Rightarrow L = 12,43 mm$$

TABLE 16-1 Typical performance parameters for bearing materials in boundary lubrication at room temperature

Material	pV		
	psi-fpm	kPa-m/s	
Vespe <sup>®</sup> SP-21 polyimide	300 000	10 500	Trademark of DuPont Co.
Manganese bronze (C86200)	150 000	5250	Also called SAE 430A
Aluminum bronze (C95200)	125 000	4375	Also called SAE 68A
Leaded tin bronze (C93200)	75 000	2625	Also called SAE 660
KU dry lubricant bearing	51 000	1785	See note 1
Porous bronze/oil impregnated	50 000	1750	
Babbitt, high tin content (89%)	30 000	1050	
Rulon <sup>®</sup> PTFE: M-liner	25 000	875	Metal backed
Rulon <sup>®</sup> PTFE: FCI	20 000	700	Oscillatory and linear motion
Babbitt, low tin content (10%)	18 000	630	
Graphite/Metalized	15 000	525	Graphite Metallizing Corp.
Rulon <sup>®</sup> PTFE: 641	10 000	350	Food and drug applications (see note 2)
Rulon <sup>®</sup> PTFE: J	7500	263	Filled PTFE
Polyurethane: UHMW	4000	140	Ultra high molecular weight
Nylon <sup>®</sup> 101	3000	105	Trademark of DuPont Co.

Source: Bearing Bearings Corp., Holland, OH

<sup>1</sup>KU Bearings consist of bonded layers of a steel backing and a porous bronze matrix overlaid with PTFE/lead bearing material. A film from the bearing material is transferred to the journal during operation.

<sup>2</sup>Rulon<sup>®</sup> is a registered trademark of Saint-Gobain Performance Plastics Company. Bearings are made from Rulon<sup>®</sup> PTFE (polytetrafluoroethylene) material in a variety of formulations and physical constructions.

**L = 16 mm**

**Tabela 13.4 Limites de Operação dos Mancais Metálicos Porosos com Lubrificação de Contorno [3]**

Material	Carga <i>P</i> Estática		Carga <i>P</i> Dinâmica		<i>V</i>		<i>PV</i>	
	MPa	(ksi)	MPa	(ksi)	m/s	(fpm)	MPa · m/s	(ksi · fpm)
Bronze	55	(8)	14	(2)	6,1	(1200)	1,8	(50)
Bronze-chumbo	24	(3,5)	5,5	(0,8)	7,6	(1500)	2,1	(60)
Cobre-ferro	138	(20)	28	(4)	1,1	(225)	1,2	(35)
Cobre-ferro temperável	345	(50)	55	(8)	0,2	(35)	2,6	(75)
Ferro	69	(10)	21	(3)	2,0	(400)	1,0	(30)
Bronze-ferro	72	(10,5)	17	(2,5)	4,1	(800)	1,2	(35)
Chumbo-ferro	28	(4)	7	(1)	4,1	(800)	1,8	(50)
Alumínio	28	(4)	14	(2)	6,1	(1200)	1,8	(50)

**Tabela 13.5 Limites de Operação dos Mancais Não-metálicos com Lubrificação de Contorno [3]**

Material	<i>P</i>		Temperatura		<i>V</i>		<i>PV</i>	
	MPa	(ksi)	°C	(°F)	m/s	(fpm)	MPa · m/s	(ksi · fpm)
Fenólicos	41	(6)	93	(200)	13	(2500)	0,53	(15)
Náilon	14	(2)	93	(200)	3,0	(600)	0,11	(3)
TFE	3,5	(0,5)	260	(500)	0,25	(50)	0,035	(1)
TFE preenchido	17	(2,5)	260	(500)	5,1	(1000)	0,35	(10)
Textura de TFE	414	(60)	260	(500)	0,76	(150)	0,88	(25)
Polycarbonato	7	(1)	104	(220)	5,1	(1000)	0,11	(3)
Acetal	14	(2)	93	(200)	3,0	(600)	0,11	(3)
Carbono (grafite)	4	(0,6)	400	(750)	13	(2500)	0,53	(15)
Borracha	0,35	(0,05)	66	(150)	20	(4000)	—	—
Madeira	14	(2)	71	(160)	10	(2000)	0,42	(12)

Fonte: Juvinall (2006)