

SEM 0327– Elementos de Máquinas III

SEM 0563 – Projeto de Sistemas Mecânicos

Aula 10 - Mancais de deslizamento

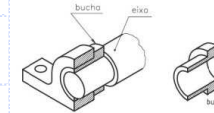
Plain bearing; Journal bearing ou sleeve bearing

Profa. Zilda de C. Silveira

São Carlos, junho de 2023

1. Mancais: função de projeto

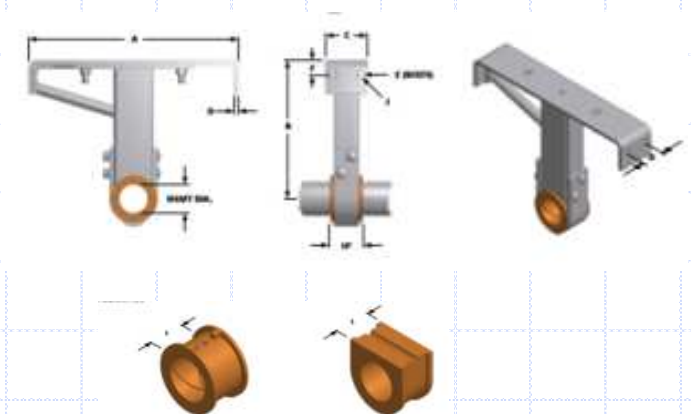
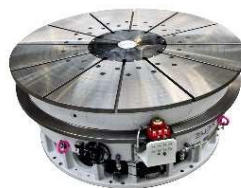
- ✓ **Suportar carga** enquanto permite **movimento relativo** entre duas superfícies de outros elementos de máquinas.



- Mancais (de elementos rolantes e planos/deslizamento) inseridos no domínio da tribologia)

- ✓ Regimes de lubrificação:

- ✓ Contorno (*Boundary*);
- ✓ Misto;
- ✓ Full (*hidrodinâmico*)



Fonte: METAL PATENTE (BABBITT) - DURAMAIS

A. Mancais de elementos rolantes: recomendações e lubrificação

TABLE 14-1 Comparison of Bearing Types

Bearing type	Radial load capacity	Thrust load capacity	Misalignment capability
Single-row, deep-groove ball	Good	Fair	Fair
Double-row, deep-groove ball	Excellent	Good	Fair
Angular contact	Good	Excellent	Poor
Cylindrical roller	Excellent	Poor	Fair
Needle	Excellent	Poor	Poor
Spherical roller	Excellent	Fair/good	Excellent
Tapered roller	Excellent	Excellent	Poor

Fonte: Mott, et al. (2018)

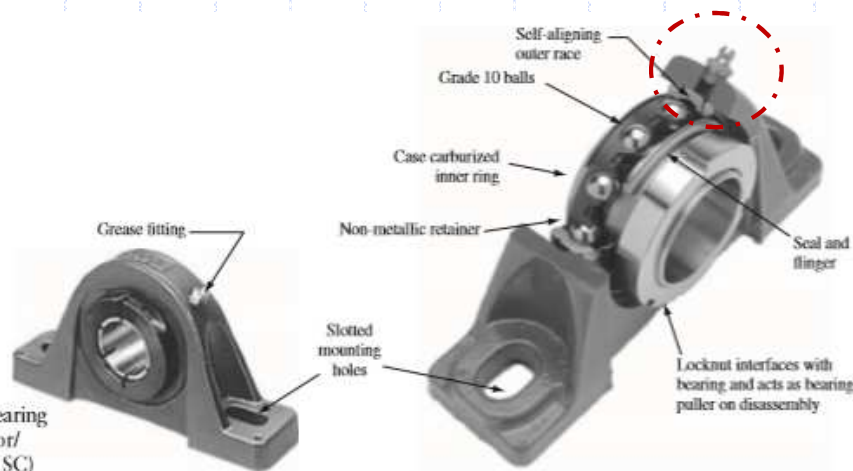
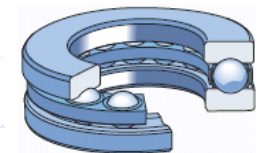
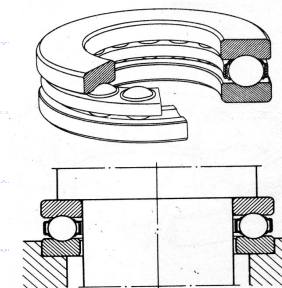
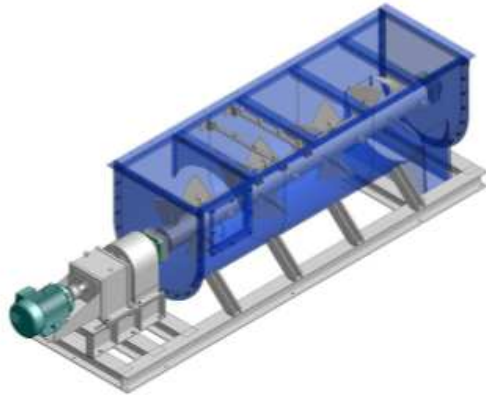


FIGURE 14-9 Ball bearing pillow block (Baldor/Dodge, Greenville, SC)

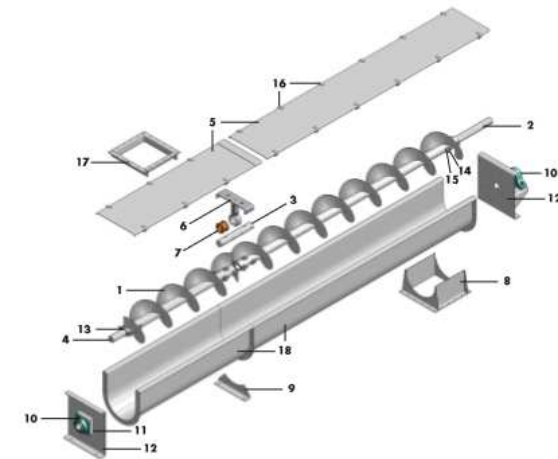


Fonte: Mott, et al. (2018)

2.1 Mancais de deslizamento: regime de lubrificação de contorno



	FLANGE MOUNTED BALL BEARING: 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.
	FLANGE MOUNTED ROLLER BEARING: 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.
	PILLOW BLOCK BALL BEARING: 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.
	PILLOW BLOCK ROLLER BEARING: 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.
	FLANGE MOUNTED SPHERICAL ROLLER BEARING: Designed to allow for expansion like ball bearings but available in larger sizes. Typically located at the tail end of larger conveyors.
	PILLOW BLOCK SPHERICAL ROLLER BEARING: Same as flange mounted version but provides bearing isolation to avoid temperature extremes and contamination from conveyed products.



Dispositivo de suspensão (Hanger)



HANGERS

HANGER BEARINGS



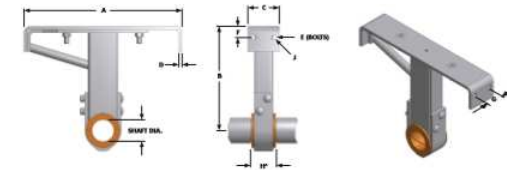
CBX (ISO 220 & 225 style hangers) CB (ISO 216 & 220 style hangers)

SHAFT DIA.	PART NUMBER	PART NUMBER	NOMINAL BORE	"I" LENGTH THROUGH BORE**
1 1/2"	CBX120*	CB120*	1.500	3.000
2"	CBX20*	CB20*	2.000	1.500
2 1/2"	CBX25*	CB25*	2.500	2.000
3"	CBX30*	CB30*	3.000	2.500
3 1/2"	CBX35*	CB35*	3.500	3.000
4"	CBX40*	CB40*	4.000	3.500
4 1/2"	CBX45*	CB45*	4.500	4.000

*Material Type: SST-304SS BR-316 EN-8 NY-Nylon LHM-ALUMINUM
 CR-304 CR-316 HC-Hard Coat RY-Rubber CR-CLAMM
 BR-316 Bronze uprights plugs CR-CLAMM NY-Rubber BR-316 NY-Nylon
 CR-304 CR-316 NY-Nylon NY-Rubber NY-Nylon

HANGER BEARING SELECTION

BEARING MATERIAL	AVAILABLE SIZES	MAX OPERATING TEMP (F)	FOR APPROVED USE	SUGGESTED USE	COMMENTS
Ball	CBX, CB	150	No	Def.	Open, Feed, Processing
Bronze	CBX	200-250*	No	Optional	Open, Feed, Processing
Br/316 uprigt plugs	CBX	200-250**	No	Optional	Open, Feed, Processing
Carbide	CBX	1000	No	Optional	Chemical Contact
En8/316	CBX	315	Yes	Optional	Feed Processing
Grainite	CBX	750	No	Def.	Open, Feed, Processing



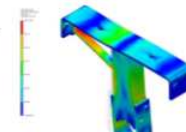
SIZE	SHAFT DIA.	PART #	A	B	C	D	ROCKS E	F	G	H*	SLOT J	WEIGHT
12	3"	BACH122263	13	7 3/8"	5"	3/8"	3/8"	1 3/8"	2 3/8"	3"	3/8" x 1"	22.3
14	3"	BACH142263	15	9 3/8"	5"	3/8"	3/8"	1 3/8"	2 3/8"	3"	3/8" x 1"	25.7
16	3"	BACH162263	17	10 3/4"	5"	3/8"	3/8"	1 3/8"	2 3/8"	3"	3/8" x 1"	28.4
18	3"	BACH182263	19	12 1/4"	5"	3/8"	3/8"	1 3/8"	3 3/8"	3"	3/8" x 1"	37.5
18	3 1/2"	BACH182263*16	19	12 1/4"	5 1/2"	3/8"	3/8"	1 3/8"	3 3/8"	4"	3/8" x 1"	46.6
20	3"	BACH202263	21	12 3/4"	5"	3/8"	3/8"	1 3/8"	3 3/8"	3"	3/8" x 1"	42.1
20	3 1/2"	BACH202263*16	21	13 3/4"	5 1/2"	3/8"	3/8"	1 3/8"	3 3/8"	4"	3/8" x 1"	50.4
24	3 1/2"	BACH242263*16	25	16 3/4"	5 1/2"	3/8"	3/8"	1 3/8"	3 3/8"	4"	3/8" x 1"	58.8
24	3 3/4"	BACH242263*16	25	16 3/4"	5 1/2"	3/8"	3/8"	1 3/8"	3 3/8"	4"	3/8" x 1"	62.5
30	3 1/2"	BACH302263*16	31	19 3/4"	6"	3/8"	3/8"	1 3/8"	4"	4"	3/8" x 1"	92.4
30	3 3/4"	BACH302263*16	31	19 3/4"	6"	3/8"	3/8"	1 3/8"	4"	4"	3/8" x 1"	89.1
36	3 3/4"	BACH362263*16	37	23 3/4"	6"	3/8"	3/8"	2 3/8"	5"	4"	3/8" x 1 3/8"	145.2
36	4 1/2"	BACH362264*16	37	23 3/4"	6"	3/8"	3/8"	2 3/8"	5"	5"	3/8" x 1 3/8"	155.0

** "I" dimension is the space between screws attached for hanger bearings. The bearing length will always be less than this dimension (See 17).
 Note: Unlike some heavy duty hangers, the Strong-Arm series uses the common (ISO-style) CBX style bearings that are available in many materials. Contact Conveyor Eng. & Mfg. for larger sizes.

NEW DESIGNS & FEA ANALYSIS

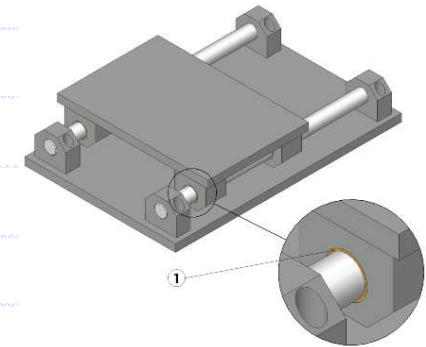
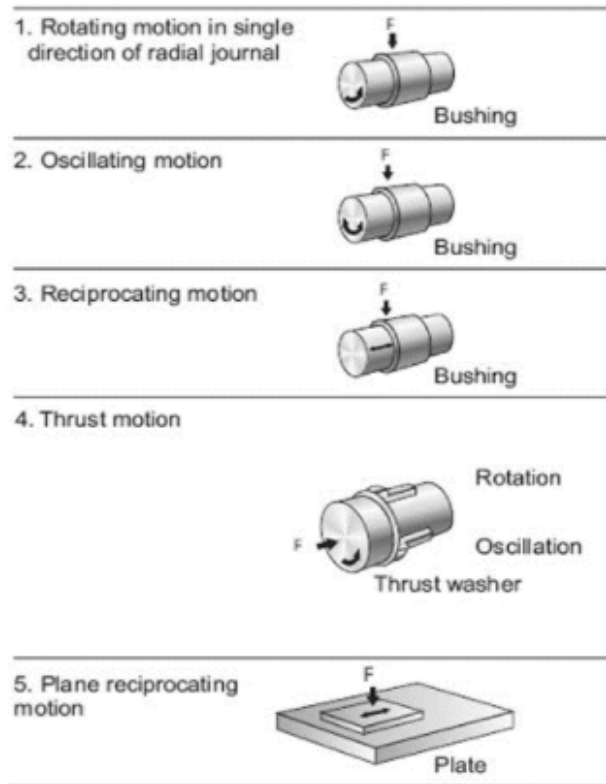
As with our Strong-Arm Quick-Switch™ hanger, all new designs must first pass a thorough FEA analysis before entering the in-service test phase. We would like to thank our long-term customers that have worked with us over the years to test new components in real world, difficult applications.

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.



2.1 Mancais de deslizamento: regime de lubrificação de contorno

- Movimento de translação * (L/D maior) – Mancal de deslizamento linear



Fonte: [CSB plastic bearings.China plastic bushings.sliding bearings.Ball Bearings.Linear Bearings.Radial Spherical Bearings Manufacturers.Suppliers.Factory and Company \(csbbearings.com\)](http://CSB plastic bearings.China plastic bushings.sliding bearings.Ball Bearings.Linear Bearings.Radial Spherical Bearings Manufacturers.Suppliers.Factory and Company (csbbearings.com))

Fonte: [Plain Bearings and Sleeve Bearings Selection Guide | Engineering360 \(globalspec.com\)](http://Plain Bearings and Sleeve Bearings Selection Guide | Engineering360 (globalspec.com))

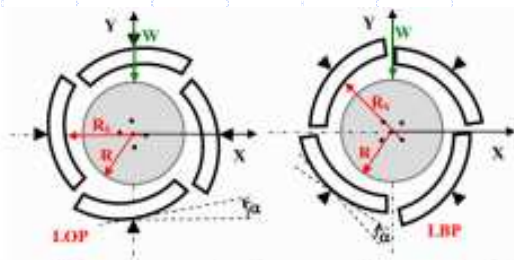
2.2 Mancais de deslizamento: regime de lubrificação *full HD*



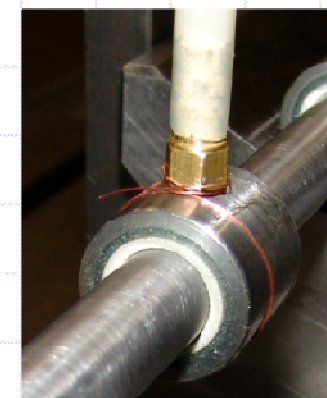
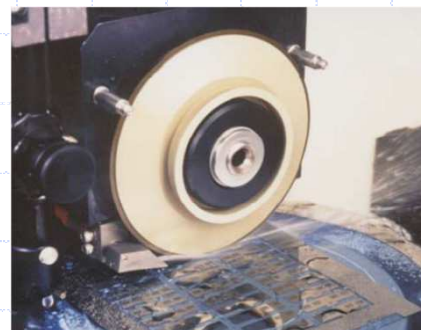
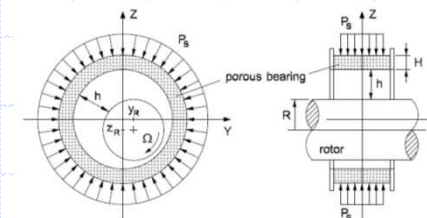
Fonte: Tapia (2002); Silveira (2003).



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



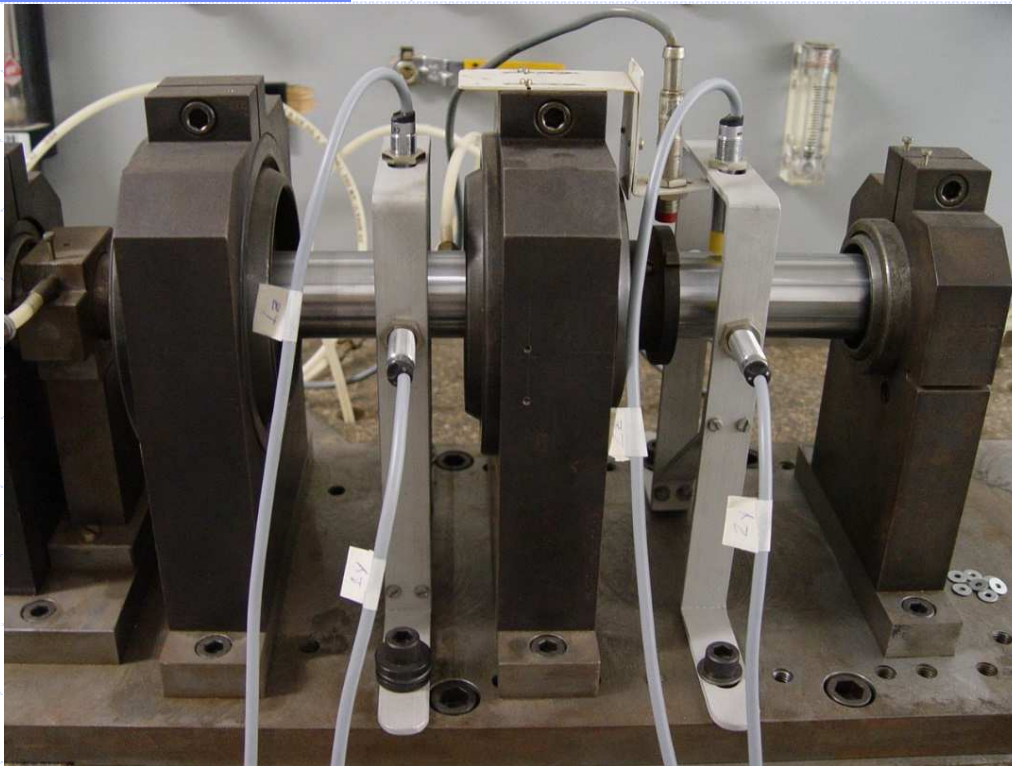
As condições de operação de um mancal segmentado. Fonte: DANIEL, 2012, p.30.



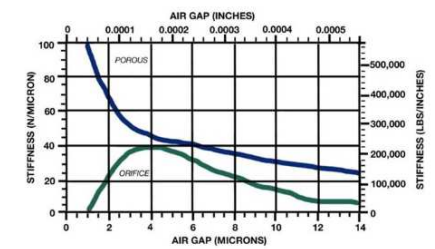
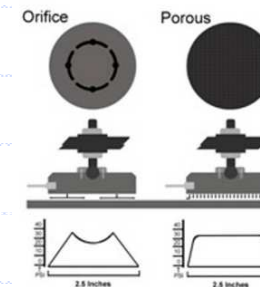
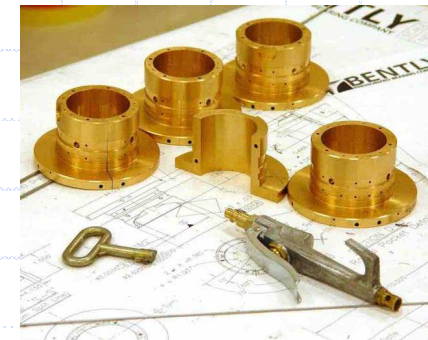
Fonte: [Tilting Pad Bearings for Fluid Film Thrust Bearing Applications \(kingsbury.com\)](http://www.kingsbury.com)

2.2 Mancais de deslizamento: regime de lubrificação *full HD*

Mancais aerostáticos



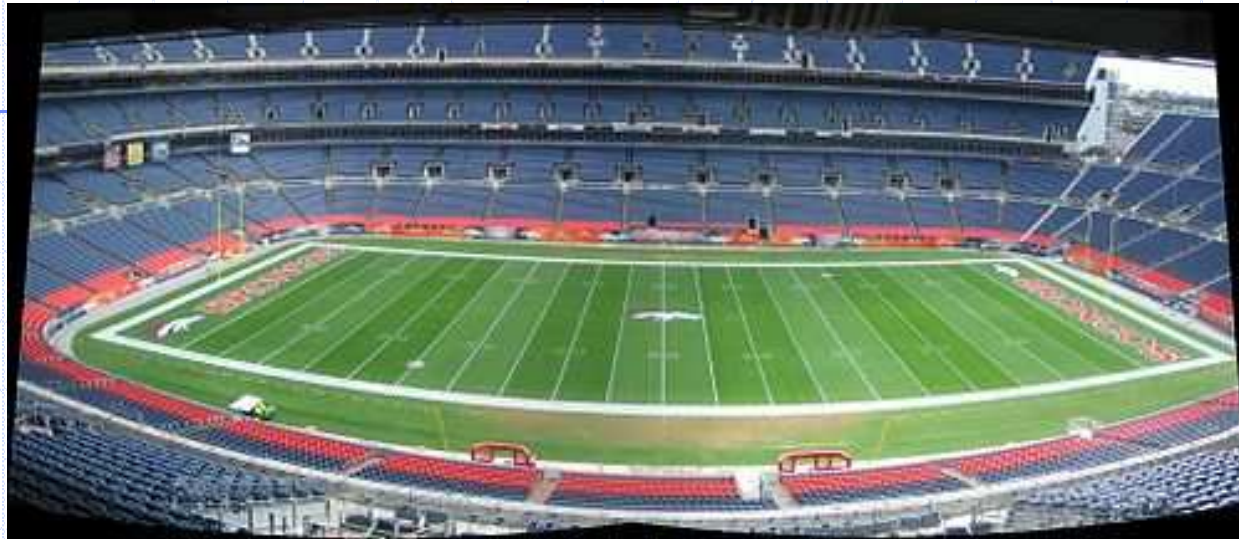
Fonte: Silveira (2007)



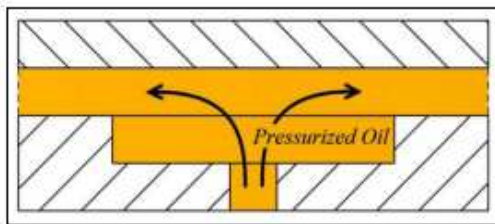
Fonte: [Restriction and Compensation of Gas Bearings – Bently Bearings](#)

2.2.1 Mancais de deslizamento regime de lubrificação *full HD* - aplicações

Estádio Mile High (Denver, EUA)



Fonte: Empower Field at Mile High - Wikiwand



Review

Advances in Mechanical Engineering

Advances in Mechanical Engineering
2017, Vol. 9(10) 1-27
© The Author(s) 2017
DOI: 10.1177/1487814617730034
jme.sagepub.com/home/ame
SAGE

A review of hydrostatic bearing system: Researches and applications

Zhifeng Liu¹, Yumo Wang¹, Ligang Cai¹, Yongsheng Zhao¹, Qiang Cheng¹ and Xiangmin Dong²

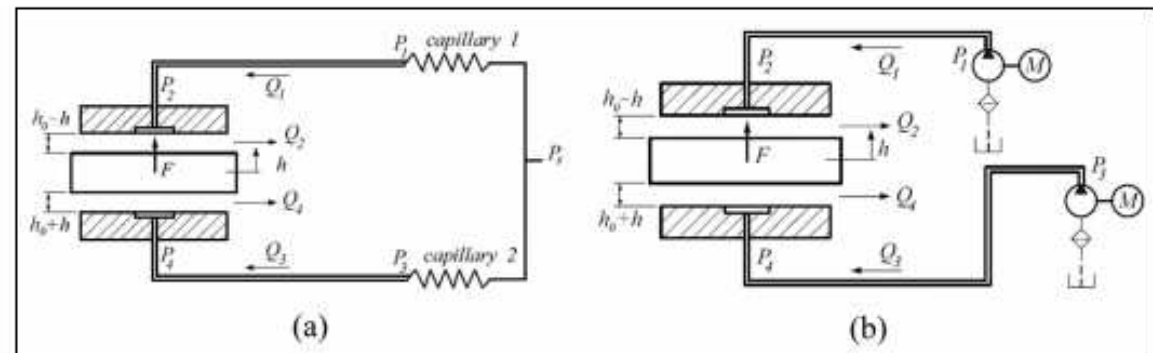
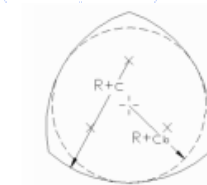
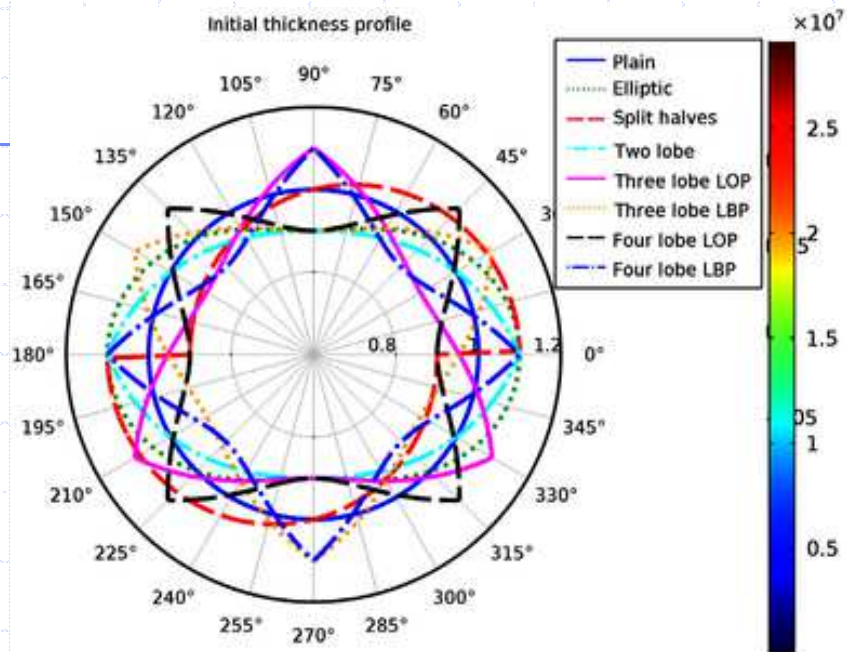
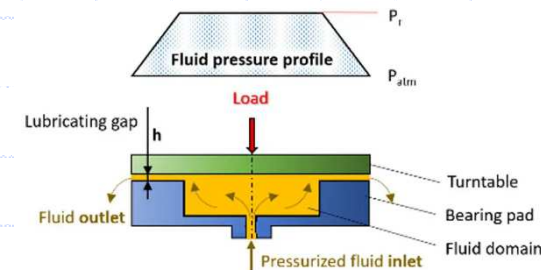


Figure 17. Model of closed-type hydrostatic thrust bearing.³⁹ (a) capillary restrictors and (b) constant flow pumps.

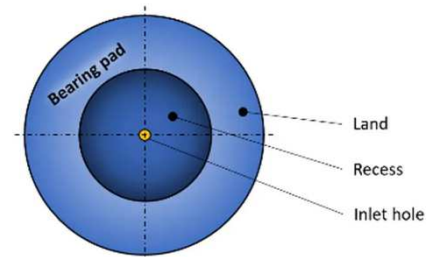
C. Design dos elementos e configurações de lubrificação em *Journal bearings*



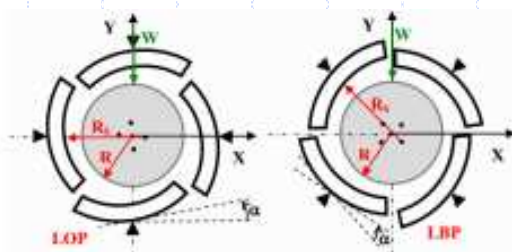
Desenho esquemático de um mancal trilobulado. Fonte: MACHADO, 2006, p.18.



Fonte: Evaluate the Performance of Different Hydrodynamic Bearings (comsol.com)



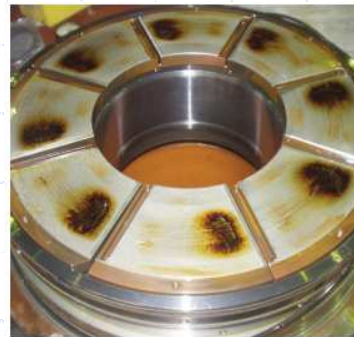
Fonte: Hydrostatic bearings - About Tribology (tribonet.org)



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



2.3 Mancais de deslizamento: modos de falha



Fonte: [Hydrodynamic Tilting Pad Bearing Theory, Operation, & Troubleshooting \(kingsbury.com\)](http://HydrodynamicTiltingPadBearingTheoryOperationandTroubleshooting.kingsbury.com)

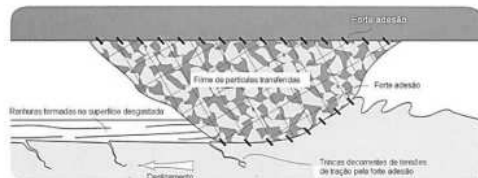


Imagem ilustrando a formação de ranhuras sobre superfícies desgastadas por filmes de partículas transferidas. Fonte: Adaptado de (GWIDON et al. 2005), citado por (MIELCZARSKI, 2015).

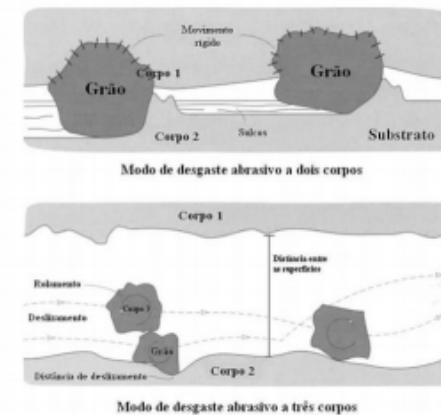
Desgaste adesivo

Tabela 11-3 Materiais recomendados para mancais para deslizamento contra aço ou ferro fundido

Material do mancal	Dureza kg/mm ²	Dureza mínima do eixo kg/mm ²	Razão de dureza
Liga <i>babbitt</i> baseada em chumbo	15-20	150	8
Liga <i>babbitt</i> baseada em estanho	20-30	150	6
Chumbo álcali endurecido	22-26	200-250	9
Chumbo-cobre	20-36	300	14
Prata	25-50	300	8
Base cádmio	30-40	200-250	6
Liga de alumínio	45-50	300	6
Liga de bronze	40-80	300	5
Bronze-estanho	60-80	300-400	5

Fonte: Wilcock and Booser, *Bearing Design and Application*, McGraw-Hill, 1957.

Fonte: Norton (2014)



Desgaste abrasivo

2.4 Materiais mancais hidrodinâmicos (HD*)

✓ Propriedades/características

- Usinabilidade (acabamento superficial e tolerâncias geométricas);
- Resistência mecânica;
- Resistência a gradientes de temperatura
- Resistência a corrosão (absorver partículas abrasivas);
- Lubricidade*.

✓ Exemplos de materiais

- **Babbits** (ligas de chumbo e estanho, com adição de pós de outros materiais – absorção de partículas e bom acabamento superficial) – 150 a 200 HB e $Ra = 0,25$ a $0,30 \mu m$)
- **Bronzes** (mancal) e eixo de aço (boa lubricidade, altas carga e temperaturas);
- **Fofo cinzento e aço**;
- **Materiais sinterizados**
- **Materiais não metálicos** (Acetal®, Teflon®, Poliamida, **PEEK**) – baixa condução de calor e resistência mecânica,.. Aditivos inorgânicos (talco ou fibra de vidro) aumentam rigidez. Grafite em pó aumentam lubricidade, resistência mecânica e térmica.

2.4 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*)

2.4 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.

2.4 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 (Polietereetercetona)... (*fillers* e reforços: fibras de vidro e de carbono, pós de bronze, grafite, dissulfeto de molibdênio).

2.4 Materiais para mancais de deslizamento

✓ Cargas e materiais

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)

Table 12-6

Some Characteristics of Bearing Alloys

Alloy Name	Thickness, in	SAE Number	Clearance Ratio r/c	Load Capacity	Corrosion Resistance
Tin-base babbitt	0.022	12	600-1000	1.0	Excellent
Lead-base babbitt	0.022	15	600-1000	1.2	Very good
Tin-base babbitt	0.004	12	600-1000	1.5	Excellent
Lead-base babbitt	0.004	15	600-1000	1.5	Very good
Leaded bronze	Solid	792	500-1000	3.3	Very good
Copper-lead	0.022	480	500-1000	1.9	Good
Aluminum alloy	Solid		400-500	3.0	Excellent
Silver plus overlay	0.013	17P	600-1000	4.1	Excellent
Cadmium (1.5% Ni)	0.022	18	400-500	1.3	Good
Trimetal 88*				4.1	Excellent
Trimetal 77†				4.1	Very good

*This is a 0.008-in layer of copper-lead on a steel back plus 0.001 in of tin-base babbitt.

†This is a 0.013-in layer of copper-lead on a steel back plus 0.001 in of lead-base babbitt.

Fonte: Shigley (2008)

2.5 Viscosidade

- A **Viscosidade** (η) 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 η , ou viscosidade cinemática ν , as quais estão relacionadas pela densidade de massa do fluido:

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

Sendo ρ : a densidade de massa do fluido.

As unidades da viscosidade absoluta (η) são **lb.s/in²** (reyn) no sistema inglês e **Pa.s** no sistema SI.

As unidades SI da viscosidade cinemática (ν) são **cm²/s** (Stoke), e as unidades inglesas são **in²/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.

2.5 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).

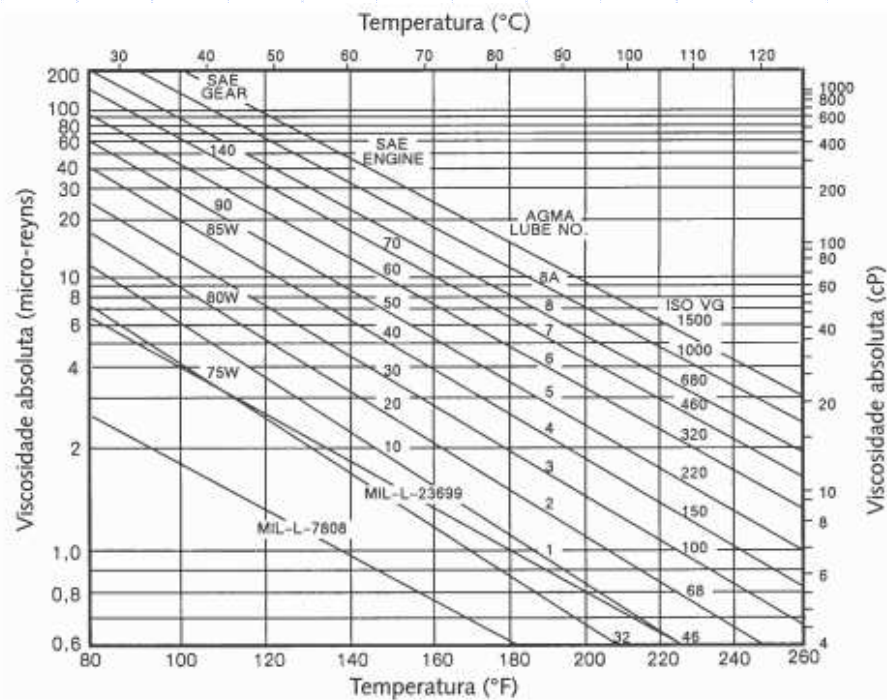
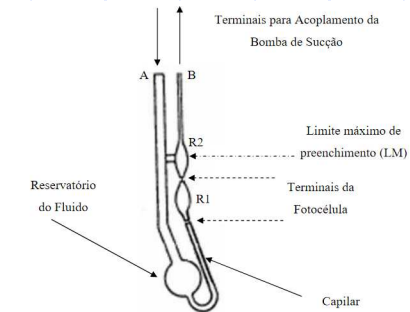


FIGURA 11-1

Viscosidade absoluta contra a temperatura de óleos lubrificantes do petróleo em escalas de viscosidade ISO. (Fonte: Extraído da Norma AGMA 2001-B88, *Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth*, com a autorização do editor, American Gear Manufacturers Association, 1500 King St., Suite 201, Alexandria, Va., 22314.)

Fonte: Norton (2014)



Esquema do Viscosímetro Capilar. Fonte: UFU

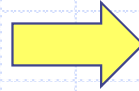


Esquema do Viscosímetro Rotacional. Fonte: <https://www.braseq.com.br/viscosimetro-rotacional-brookfield>

2.6 Parâmetro adimensional 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**.

Parâmetro de deslizamento



$$\frac{\mu N}{p}$$

$\geq 1,7 \cdot 10^6$, recomendação de Mckee (1932), filme estável.

μ^* : viscosidade do lubrificante (absoluta)

N : velocidade de rotação do eixo

P = pressão na superfície do mancal (FR/LD)

Observe, que para **baixos valores** de

$$\frac{\mu n}{p}$$

ocorre a **lubrificação de camada**

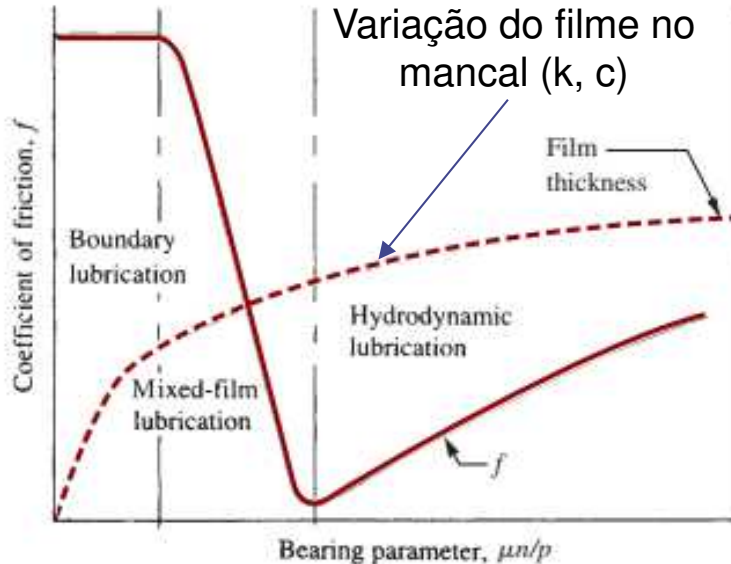


Figura 1 - Curva de Stribeck

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:

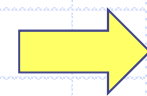
$$\frac{\mu n}{p}$$

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

2.6 Parâmetro adimensional de deslizamento

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

Parâmetro de deslizamento



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

μ^* : viscosidade do lubrificante (absoluta)

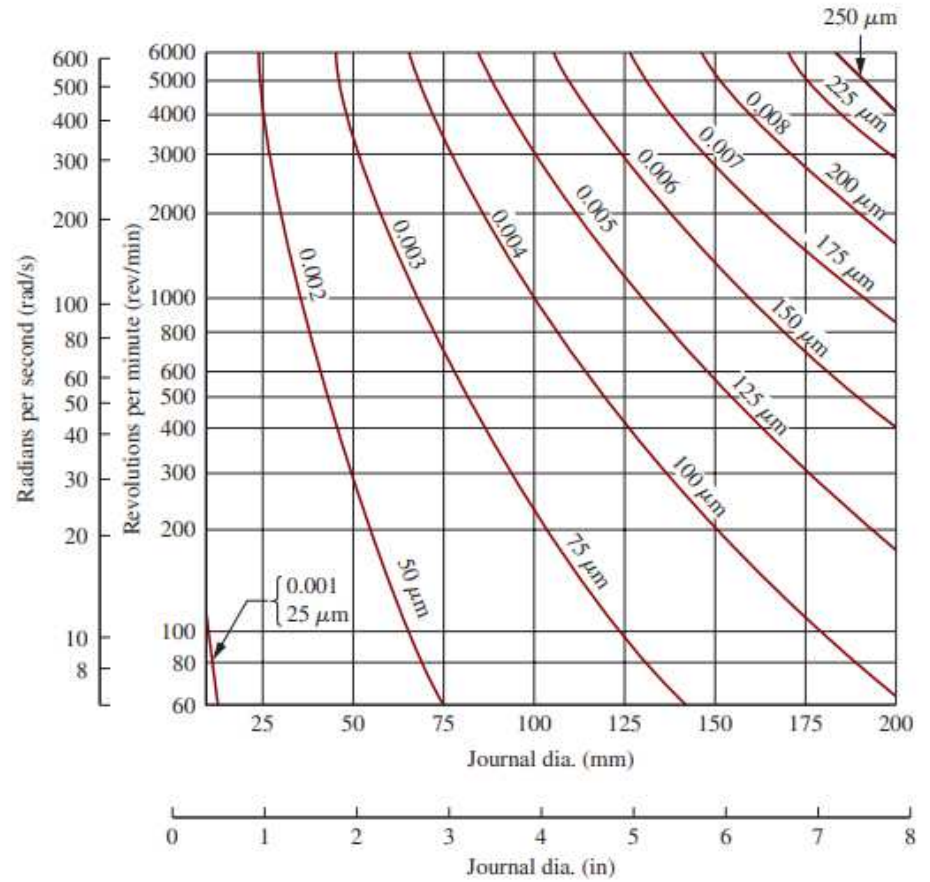
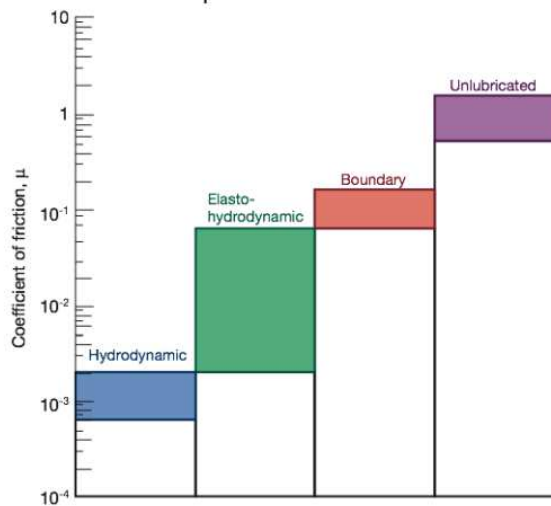
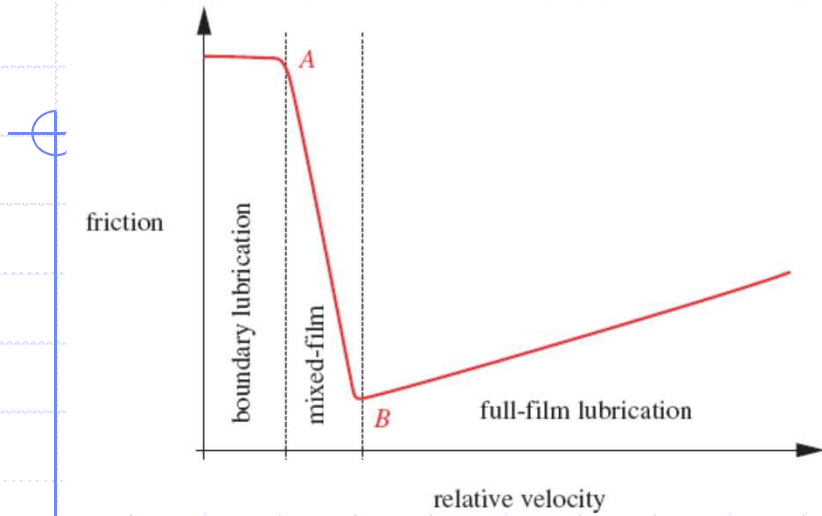
N: velocidade de rotação do eixo

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

Unit system	Viscosity, μ	Rotational speed, n	Pressure, p
SI metric	N·s/m ² or Pa·s	rev/s	N/m ² or Pa
English	lb·s/in ² or reyn	rev/s	lb/in ²
Old metric (obsolete)	dyne·s/cm ² or poise	rev/s	dynes/cm ²

Fonte: Mott, *et al.* (2018)

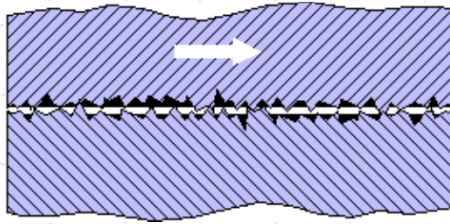
2.6.1 Viscosidade – Coeficiente de atrito x velocidade relativa



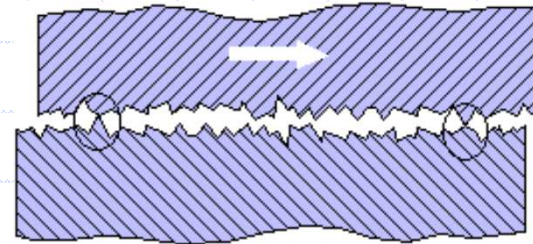
Ábaco: Folga diametral mínima recomendada para **mancais de deslizamento** (diâmetro do jornal x Velocidade de Rotação. Fonte: Mott, *et al.* (2018))

3. Regimes de lubrificação

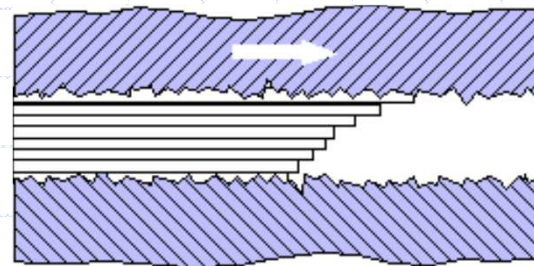
➤ Classificação: grau com que o lubrificante/folgas separam as superfícies em deslizamento relativo.



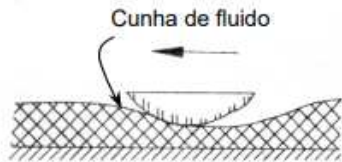
Camada limite (Limítrofe) : coeficiente de atrito 0,05 a 0,20.



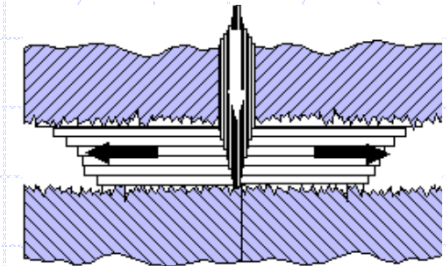
Lubrificação de película mista : coeficiente de atrito 0,04 a 0,10.



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



Formação de cunha de fluido em um sistema deslizante lubrificado [BAYER, 1994].

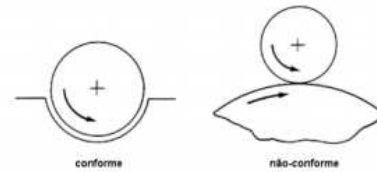


Hidroestática

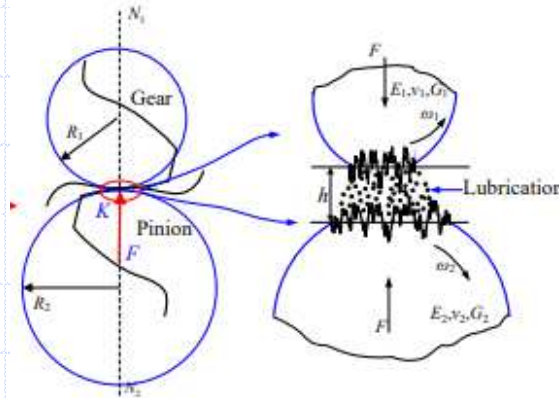
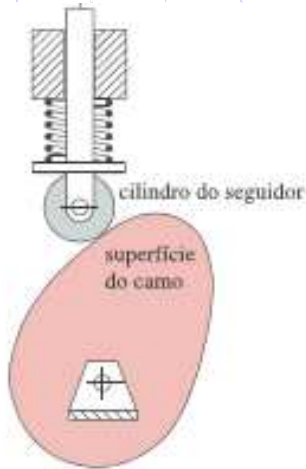
EHD

D. Exemplos - EHD

Lubrificantes EP (aditivos)



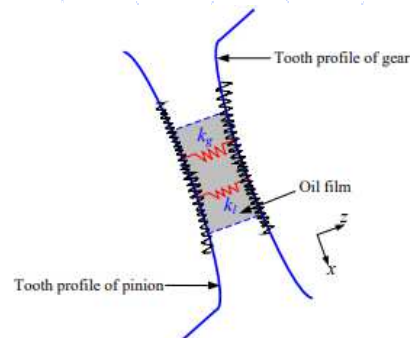
Geometrias de contato conforme e não-conforme. Fonte: Adaptado de (ASM Handbook – Vol. 18, 1992), citado por PROFITO, 2010).



Rolamento e deslizamento

Fonte: Xiao;Wu (2021)*

Fonte: Norton (2011)



3.1 Lubrificantes para mancais de deslizamento

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

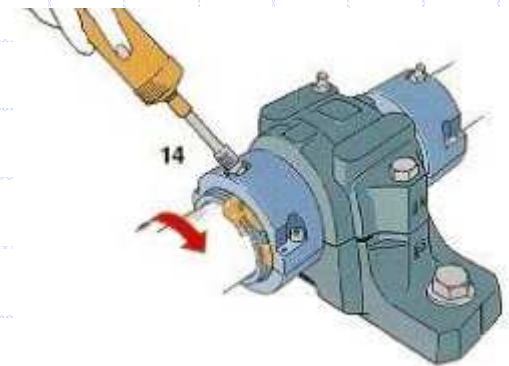
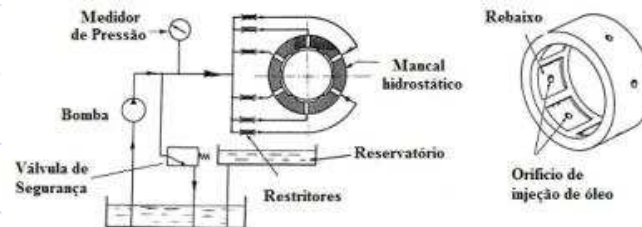
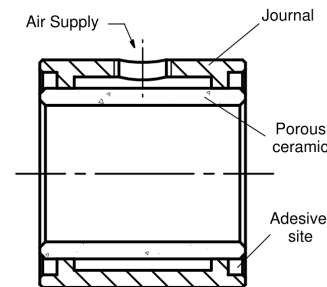
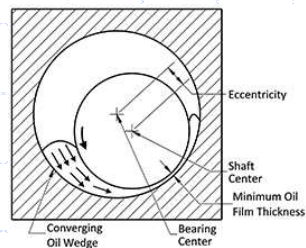
Estado: gasoso, líquido e sólido.

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.

3.2 Subsistema 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.



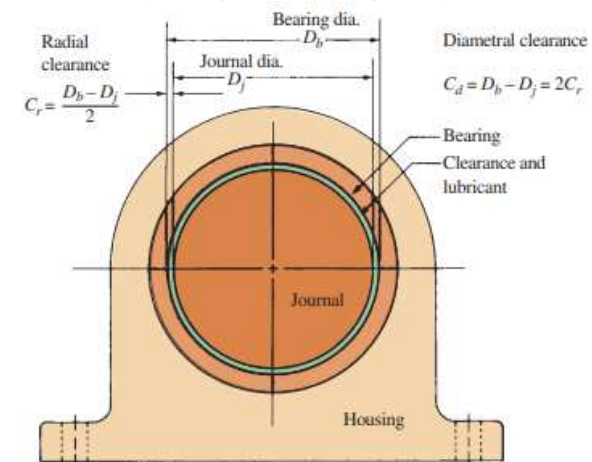
* Parâmetros de projeto para projeto de mancais de deslizamento

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 Multifatorial

- 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.**

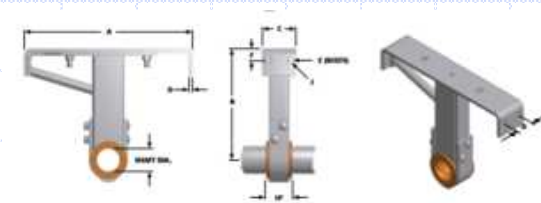
4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento com lubrificação limítrofe/mista

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

Dados para projeto de mancais de deslizamento

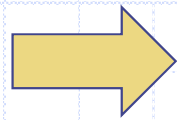
- **Coefficiente de atrito (f)** (condições de partida e operação)
- **Capacidade de carga (p):** - Carga radial atuando sobre a superfície de deslizamento
- **Velocidade de operação (V):** velocidade relativa entre os componentes girante e estacionário
- **Temperatura em condições operacionais**
- **Limitações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

➤ **Fator pV (taxa de energia absorvida)**



4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento com lubrificação limítrofe/mista

- **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 com lubrificação limítrofe/mista

TABLE 16-1 Typical Performance Parameters for Bearing Materials in Boundary Lubrication at Room Temperature

Material	pV		
	psi-fpm	MPa-m/s	
Vespe [®] SP-21 polyimide	300 000	10.500	Trademark of DuPont Co.
DP11™, oiled	286 000	10.02	GGB Bearing Technology
Manganese bronze (C86200)	150 000	5.250	Also called SAE 430A
Aluminum bronze (C95400)	125 000	4.375	Also called SAE 68A
DX [®] 10, dry or oiled	80 000	2.800	GGB Bearing Technology
Leaded tin bronze (C93800)	75 000	2.625	Also called SAE 660
DU [®]	51 400	1.800	GGB Bearing Technology
BU dry lubricant bearing	51 000	1.785	See note 1
Porous bronze/oil impregnated	50 000	1.750	
Babbitt: high tin content (89%)	30 000	1.050	
DP11™, dry	28 600	1.000	GGB Bearing Technology
Babbitt: low tin content (10%)	18 000	0.630	
Graphite/Metalized	15 000	0.525	Graphite Metallizing Corp.
Rulon [®] PTFE: 641	10 000	0.350	Food and drug applications (see note 2)
Rulon [®] PTFE: J	7500	0.263	Filled PTFE
Polyurethane: UHMW	4000	0.140	Ultra-high molecular weight
Nylon [®] 101	3000	0.105	Trademark of DuPont Co.

See Internet sites 2-7, 16, and 17.

Notes:

¹ BU 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.

² 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.

Fonte: Mott (2018)

Table 12-7

Some Materials for Boundary-Lubricated Bearings and Their Operating Limits

Material	Maximum Load, psi	Maximum Temperature, °F	Maximum Speed, fpm	Maximum PV Value*
Cast bronze	4 500	325	1 500	50 000
Porous bronze	4 500	150	1 500	50 000
Porous iron	8 000	150	800	50 000
Phenolics	6 000	200	2 500	15 000
Nylon	1 000	200	1 000	3 000
Teflon	500	500	100	1 000
Reinforced Teflon	2 500	500	1 000	10 000
Teflon fabric	60 000	500	50	25 000
Delrin	1 000	180	1 000	3 000
Carbon-graphite	600	750	2 500	15 000
Rubber	50	150	4 000	
Wood	2 000	150	2 000	15 000

*P = load, psi; V = speed, fpm.

Fonte: Shigley (2008)

4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento com lubrificação limitrofe/mista

➤ Temperatura de operação

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

4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento com lubrificação limítrofe/mista

➤ 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

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



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

Unidade de transferência de potência ou energia por unidade de área

4. Pré-dimensionamento de mancais de deslizamento com lubrificação limítrofe/mista

➤ 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,

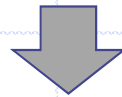
$$pV = \text{MPa.m/s} = \frac{10^6 \text{ N}}{m^2} \frac{m}{s} = \frac{10^6 \text{ W}}{m^2}$$

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

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

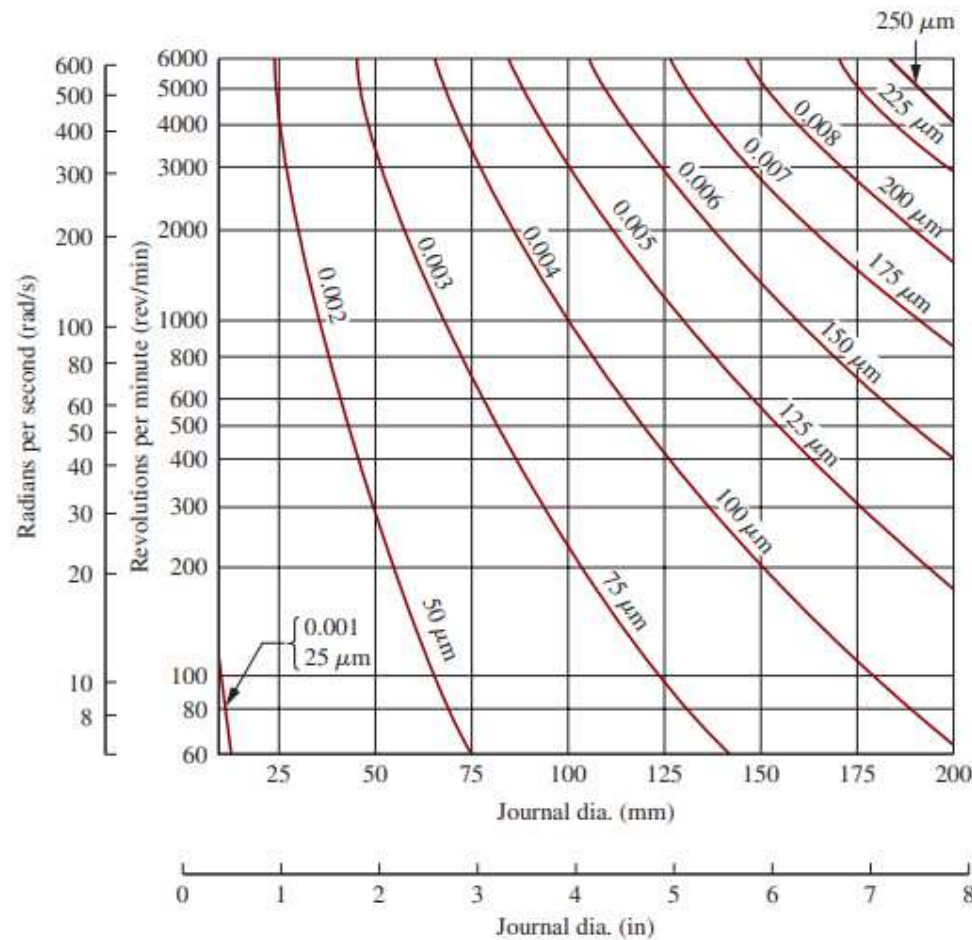
Dados de entrada: carga radial no mancal (F_r); Velocidade de rotação (n); diâmetro nominal mínimo do eixo (D_{min})* / estimativa da deflexão do eixo.

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



Ábaco: Folga diametral mínima recomendada para mancais de deslizamento (diâmetro do jornal x Velocidade de Rotação. Fonte: Mott, *et al.* (2018))

6. Exemplo de pré-dimensionamento de mancais de deslizamento – lubrificação limítrofe

- Um mancal de deslizamento deve ser projetado para sustentar uma carga radial de 150 lbf. 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 de contorno.

Resolução

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

6. Exemplo de pré-dimensionamento de mancais de deslizamento – lubrificação limítrofe

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

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

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

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.

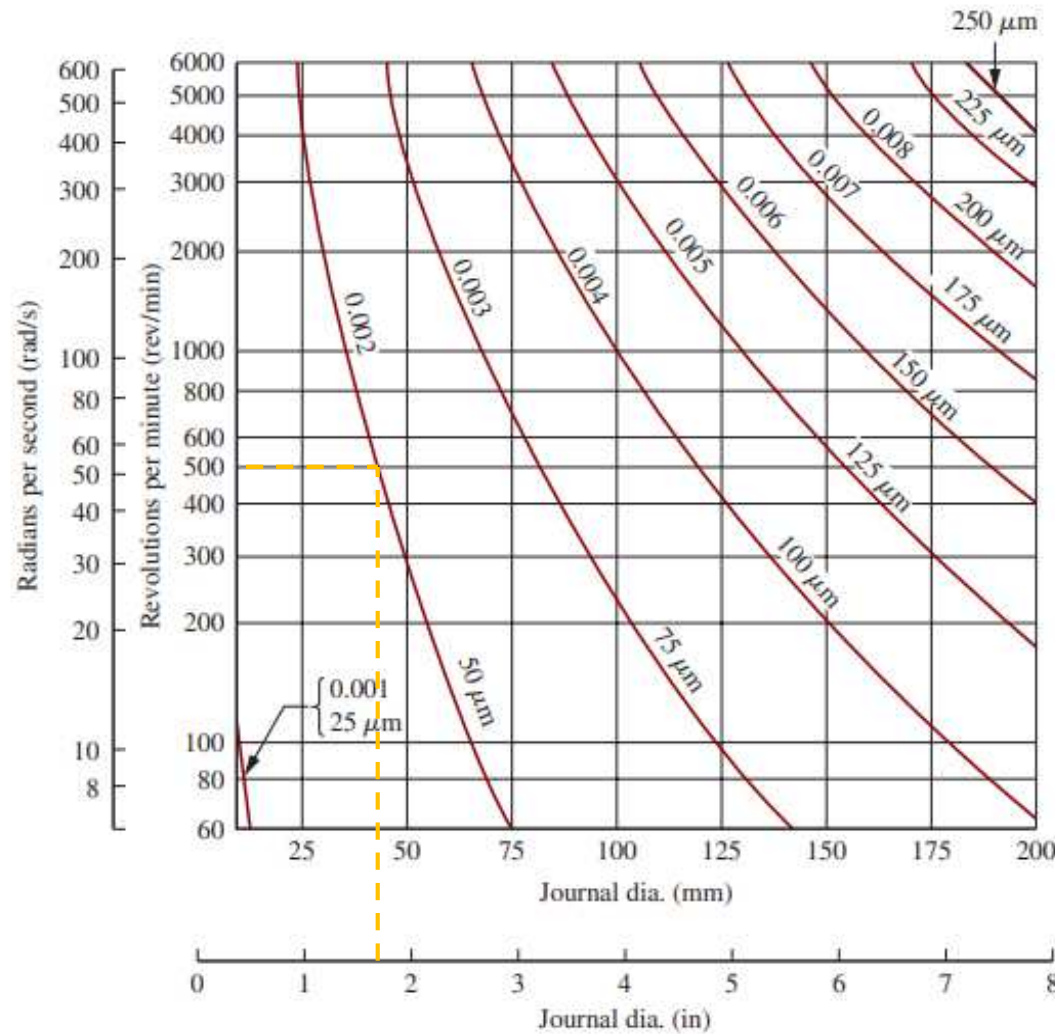
Source: Bunting Bearings Corp., Holland, OH

¹KU 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.

²Rulon[®] 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.

6. Exemplo de pré-dimensionamento de mancais de deslizamento – lubrificação limítrofe

8. Escolha da folga nominal:



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



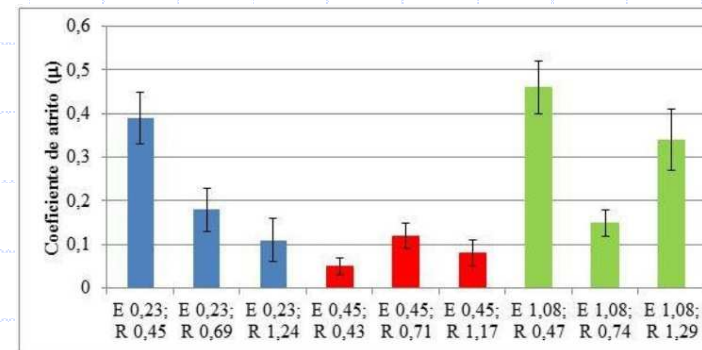
Folga diametral (C_d) = 50 μm ou (0,002)''

6. Exemplo de pré-dimensionamento de mancais de deslizamento – lubrificação limítrofe

8. Estimativa do coeficiente de atrito em função do material selecionado: **Babbitt®**

BASE ESTANHO			
Liga (ASTM B23)	Compress. Máxima à 100°C [bar]	Veloc. Máxima [m/min]	Temp. Máxima [°C]
#1	180	760	370
#2	205	750	350
#3	215	780	420
#11	225	800	480
BASE CHUMBO			
Liga (ASTM B23)	Compress. Máxima [bar]	Veloc. Máxima [m/min]	Temp. Máxima [°C]
#7	110	230	270
#8	120	265	275
#13	125	255	250
#15	125	300	280

Critérios básicos de seleção da liga de metal patente a ser aplicada sobre o colo de deslizamento do mancal



Estudo do comportamento tribológico do par liga Babbitt – aço ABNT 1045 quando variadas a espessura e a rugosidade do revestimento

Study of the tribological behavior of the Babbitt alloy – steel ABNT 1045 pair when varied thickness and roughness of the coating

Rafael Martins Ribeiro, Marcelo Araújo Câmara

Fonte: METAL PATENTE (BABBITT) - DURAMAIS

➤ Curva de Stribeck para conferir regime de lubrificação

9. Projeto da manufatura do mancal (processos de usinagem, dureza, acabamento superficial/tolerâncias; subsistema de alimentação de lubrificante e periféricos e facilidade de acesso a manutenção).

6. Exemplo de pré-dimensionamento de mancais de deslizamento – 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 lubrificação de contorno/seco sob carregamento oscilatório

➤ Nesse caso, o eixo está em condição quase-estática.

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 dFonte: o eixo: Definir oscilações em número de ciclos:

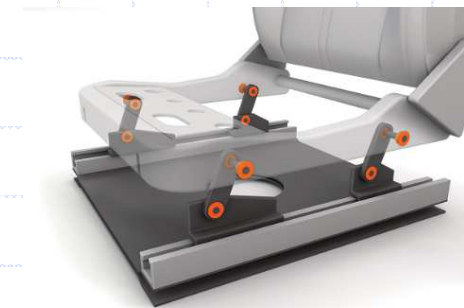
φ = ângulo de oscilação em uma direção [graus ou rad]

n_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]



Fonte: [Aplicações em ajuste de assento Automotivo | igus®](#)

7. Mancais de deslizamento com lubrificação de contorno/seco sob carregamento oscilatório

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

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



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

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 (φ) 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 [®] 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: 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 [®] 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: Bearing Bearings Corp., Holland, OH

¹KU 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.

²Rulon[®] 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.

L = 16 mm

8. Exemplo

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

Material	Carga P Estática		Carga P Dinâmica		V		PV	
	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	P		Temperatura		V		PV	
	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: Juvinal (2006)

9. Fabricantes de elementos de movimentação linear/acionamento

https://rolamentosradial.com.br/catalogos/



Solicite cotação online

comercial@rolamentosradial.com.br



Inicial

Empresa

Produtos

Fornecedores

Catálogos

Serviços Técnicos

Notícias

Contato



Catálogos

NSK

TIMKEN



ROLLWAY

IKO

NTN **SNR**

Koyo

BECO Italy



McGILL

NADELLA



RBC
BEARINGS

BGL
BERTOLOTO & GROTTA

FCM
FABRICA DE MANCAIS CURITIBA LTDA.

SEALMASTER

DODGE
POWERFUL SOLUTIONS™

Morse

ROLMAX

THOMSON
Linear Motion. Optimized.™

HIWIN
Linear Motion Products & Technology

Rexroth
Bosch Group
Distribuidor Autorizado

SABO

FREUDENBERG-NOK
INNOVATING TOGETHER

RENTORES
SAV

VULKAN
DRIVE TECH

Martin

Continental
ContiTech

Kanaflex
S/A INDUSTRIA DE PLASTICOS

