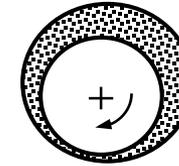
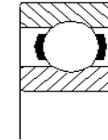


10 – Mancais Hidrodinâmicos (de escorregamento)

10.1 – Introdução

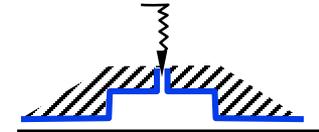
Mancais convencionais

- de rolamentos
- hidrodinâmicos

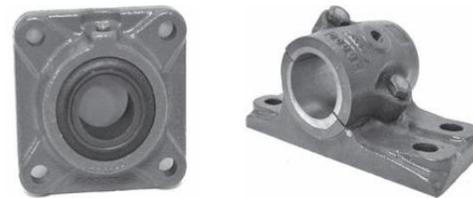
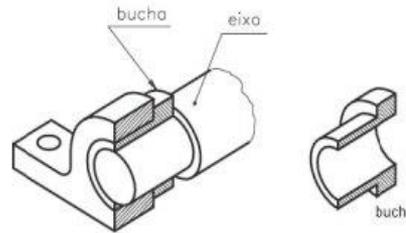


Mancais especiais

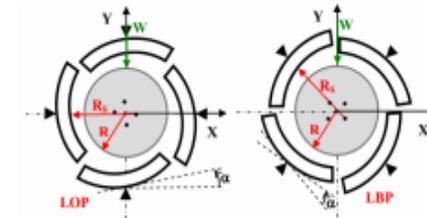
- Hidrostáticos
- Aerostáticos
- Aerodinâmicos



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



(a) Self-lubricated flange-mounted bearing (b) Grease-lubricated journal bearing
Two styles of boundary-lubricated bearings (Baldor/Dodge, Greenville, SC)



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

Fonte: Mott et al., 2018.

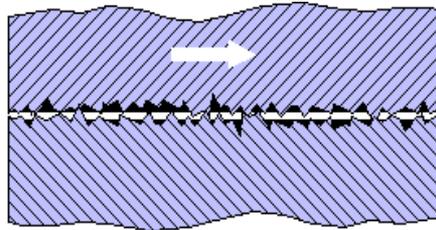
➤ Movimento de rotação (L/D – baixo) – Mancal curto

➤ Movimento de translação (L/D maior) – Mancal linear

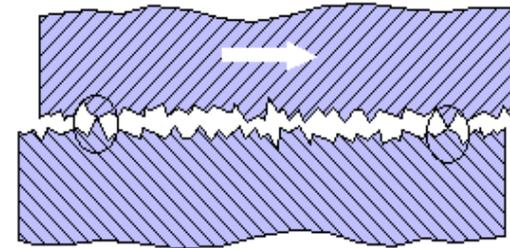


Desenho esquemático de um mancal trilobulado. Fonte: MACHADO, 2006, p.18.

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



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

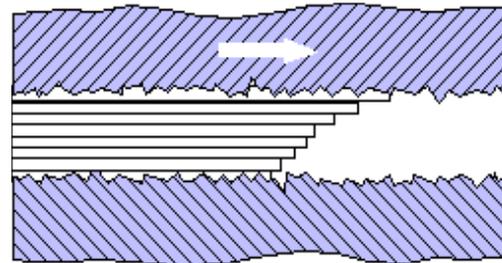


Lubrificação de película mista : coeficiente de atrito 0,04 a 0,10.

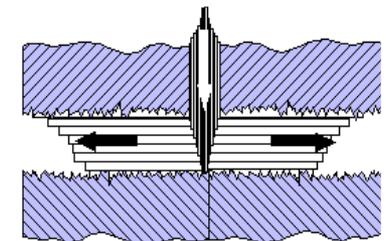


Rolamento e deslizamento

EHD



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



Hidrostática

Variação de mancais de deslizamento

- Mancal de deslizamento seco (Ex: dobradiças)
- Mancal de deslizamento com lubrificação limite (Ex: mecanismos – fusos)
- Mancal hidrodinâmico (HD) (Ex: turbinas)
- Mancal hidrostático (Ex:



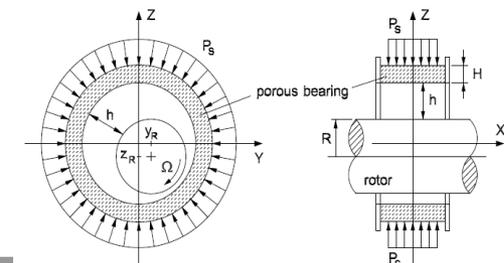
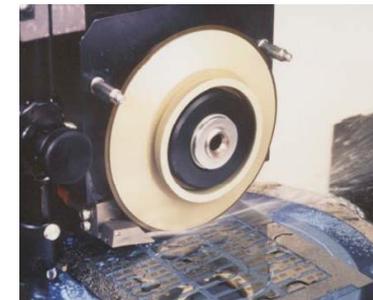
Tipos de sulcos para buchas de mancais de deslizamento (Bunting Bearings Corp. Holland, OH *apud* Mott 2013)



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



Fonte: Silveira et al. (2009)



Fonte: Nicoletti; Silveira; Purquerio (2009)

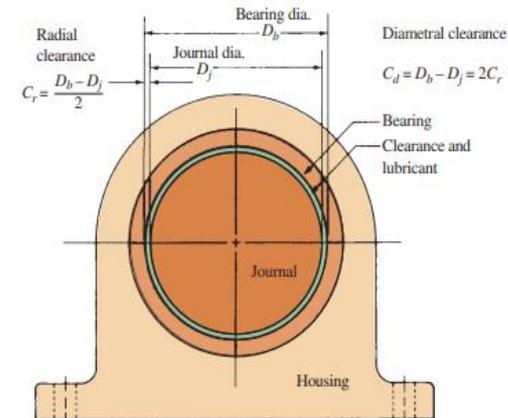
Parâmetros de projeto para mancais cilíndricos de deslizamento

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 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.**

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)

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)

✓ Cargas e materiais

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.

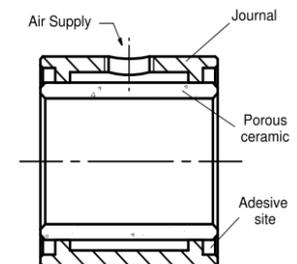
- Os lubrificantes podem atuar como contaminantes na superfície metálica e revesti-las com monocamadas de moléculas que inibem a adesão até mesmo de metais compatíveis (e.g. lubrificante EP).
- **Lubrificantes Líquidos:** são principalmente baseados no petróleo ou óleos sintéticos, embora a água e o 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.

Sistemas de lubrificação

Método de suprimento do lubrificante à superfície de deslizamento:

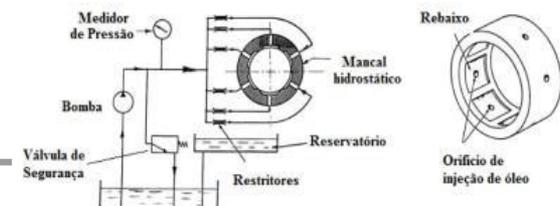
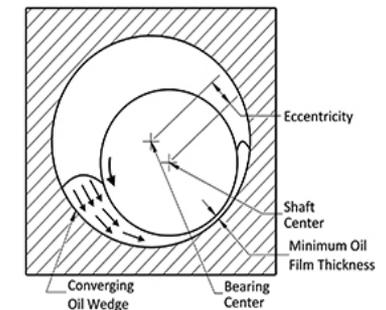
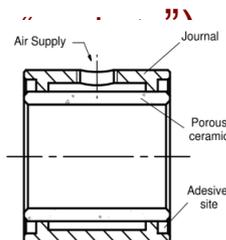
- Sua distribuição e seu escoamento (extremidades) dentro da área de deslizamento (uso de bombas – da própria máquina) – engrenagem em banho, copo de óleo por gravidade,...
- Quantidade de calor gerada no mancal e seu efeito sobre a temperatura do lubrificante;
- Dissipação do calor no mancal – uso de 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”)



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 -



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.

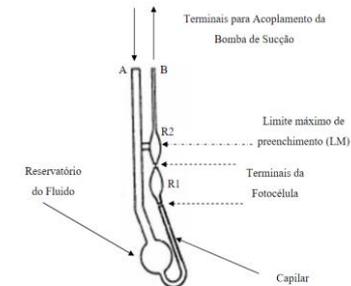
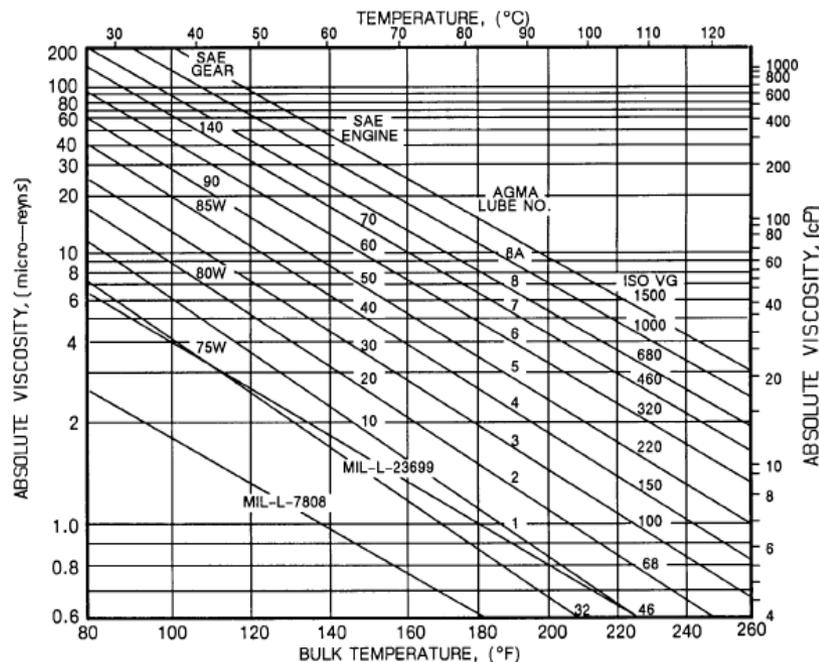
As unidades da viscosidade absoluta (η) são **lb.s/in²** (reyn) no sistema inglês e **Pa.s** no sistema SI.

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

- **Obtenção da viscosidade cinemática (reômetro/viscosímetro):**
 - 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.

- 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.brseq.com.br/viscosimetro-rotacional-brookfield>

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 diferente 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*)

- **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.

- **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.

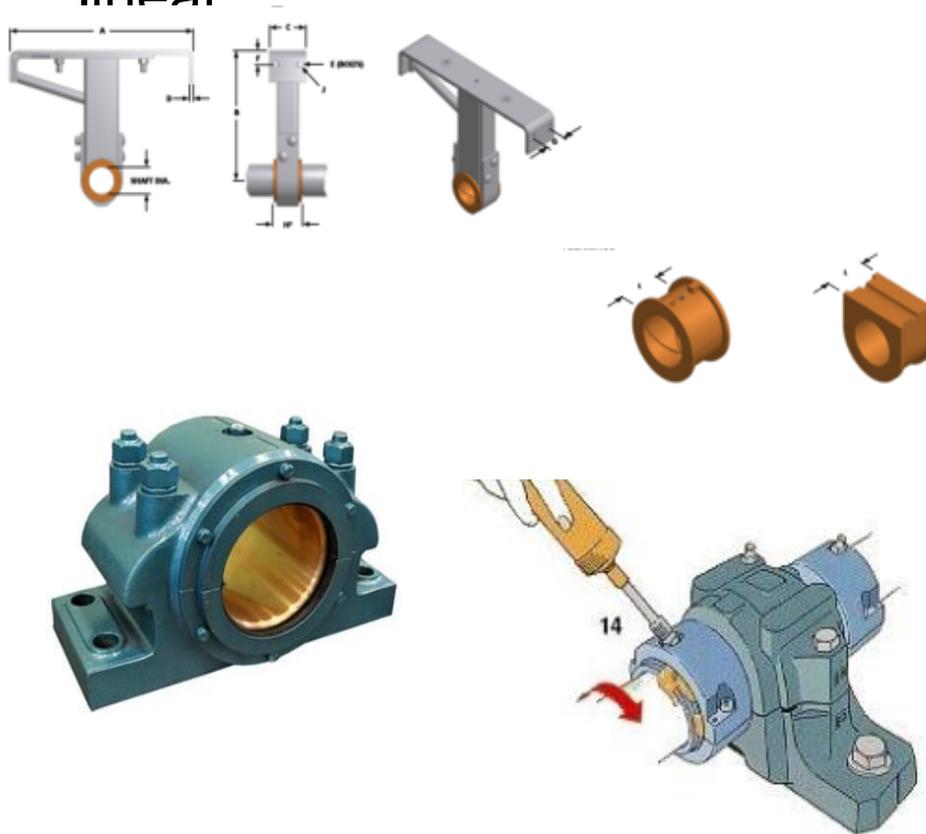
- Boa propriedade de incorporabilidade e resistência à emperramento, mas com baixa resistência mecânica, condição que limite o valor da carga (Reforços com luvas metálicas, para melhorar a resistência).
- Vantagens: boa resistência à corrosão, e operando à seco, baixa probabilidade de contaminação.

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.

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 de modo linear



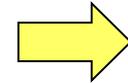
Parâmetros de projeto

- **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**

- ✓ 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	$N \cdot s/m^2$ or $Pa \cdot s$	rev/s	N/m^2 or Pa
English	$lb \cdot s/in^2$ or reyn	rev/s	lb/in^2
Old metric (obsolete)	$dyne \cdot s/cm^2$ or poise	rev/s	$dynes/cm^2$

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

Formas construtivas

