PMR 3202

Mancais

Mancais de Deslizamento

Mancais

1. Definição

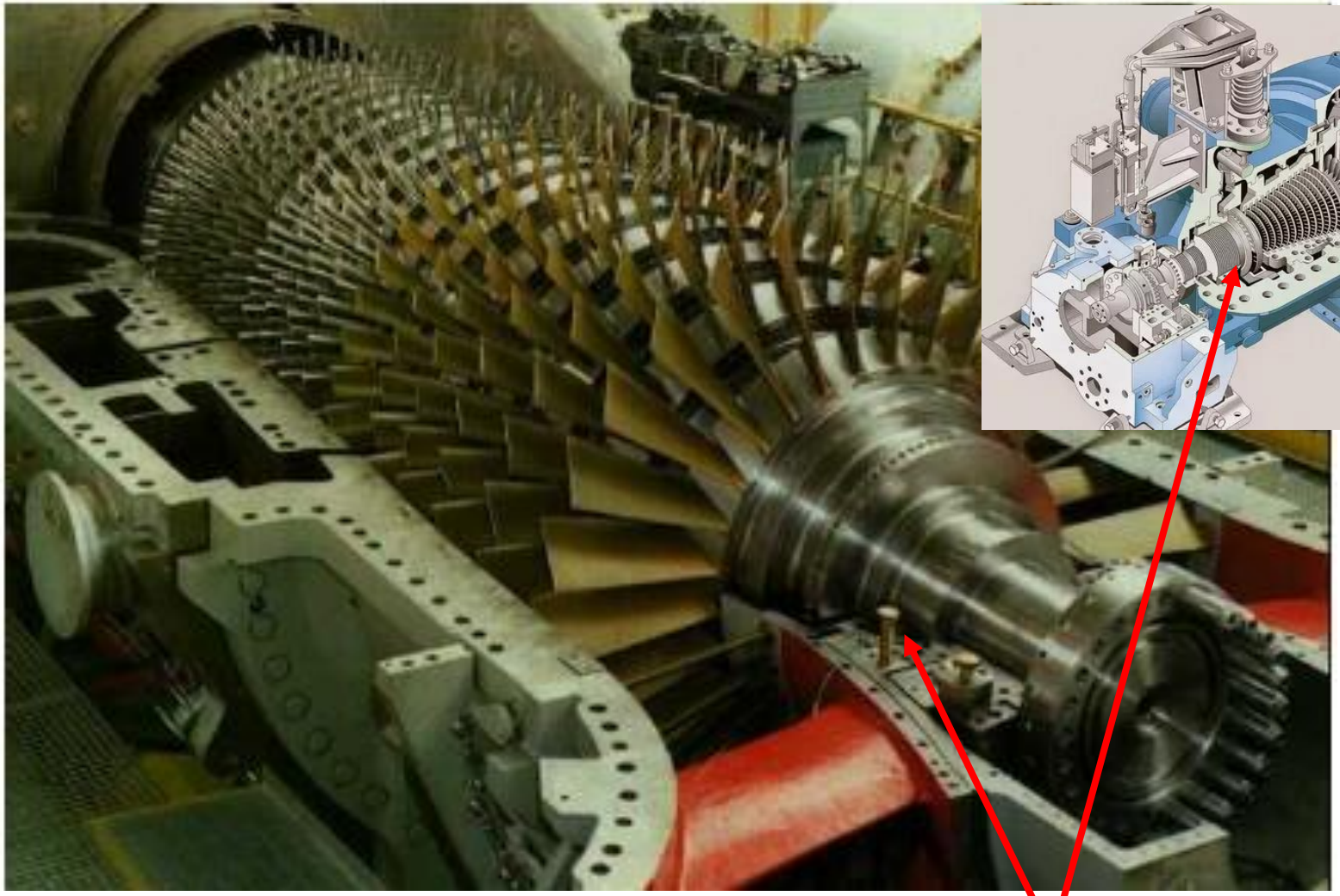
O mancal é um elemento de máquina cuja função principal é **vincular uma peça móvel** (usualmente um eixo) à **parte "fixa" do equipamento** (estrutura), **permitindo movimento relativo entre as partes** acima citadas, bem como a transmissão de esforços entre as mesmas. O vinculo pode servir de guia para a peça móvel.

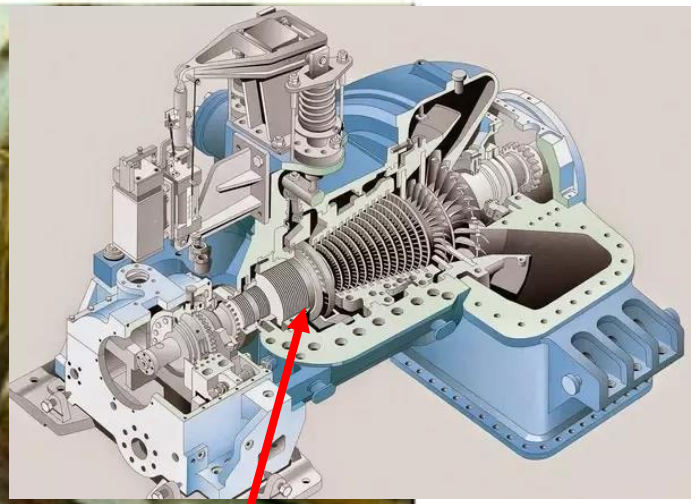
Um mancal facilita o movimento relativo, de baixo atrito, rotacional ou translacional entre dois elementos de máquina transmitindo simultaneamente as forças entre eles assim como guiando e posicionando um com relação ao outro.

Mancais

Mancal

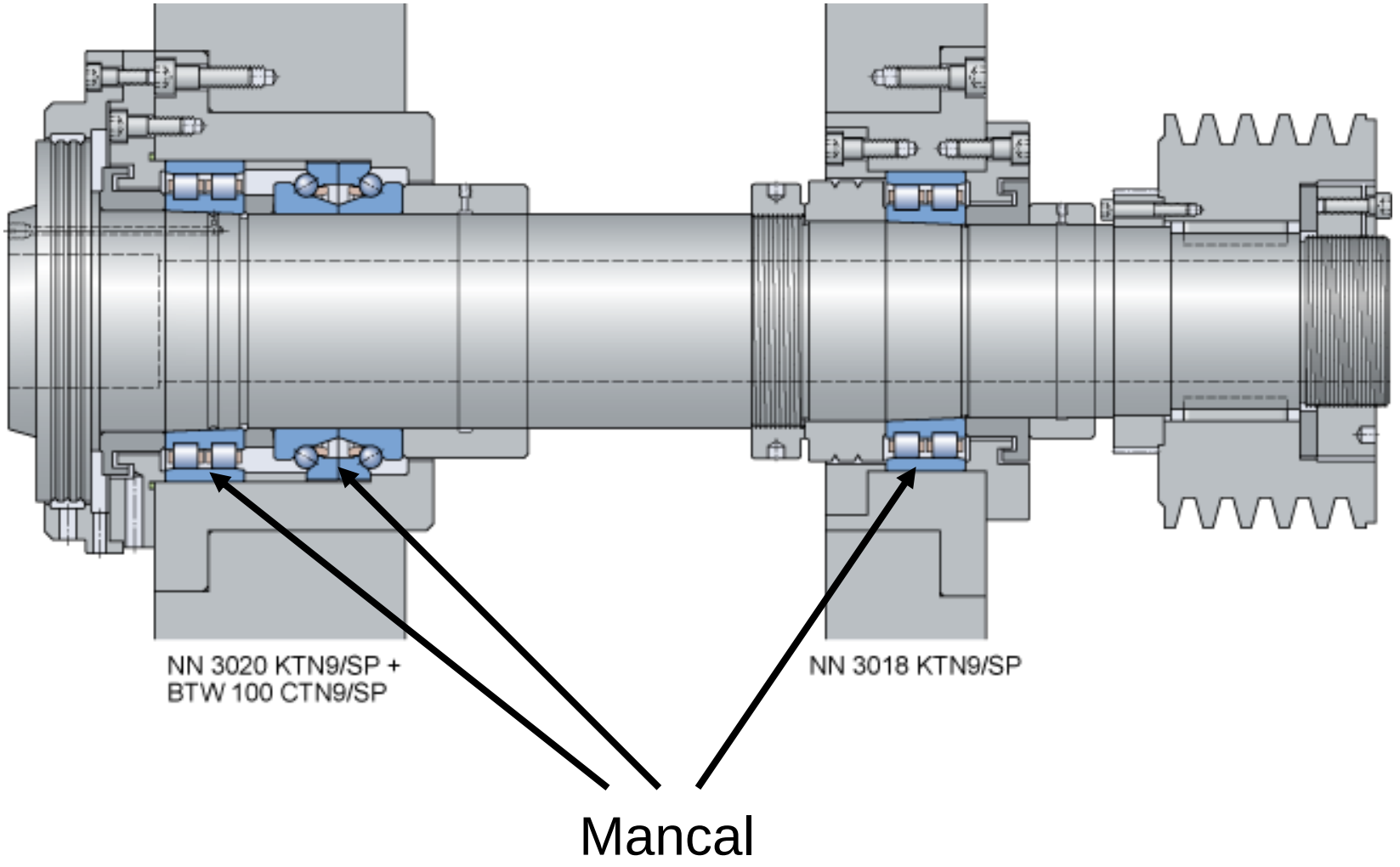
Eixo e palhetas de turbina a vapor



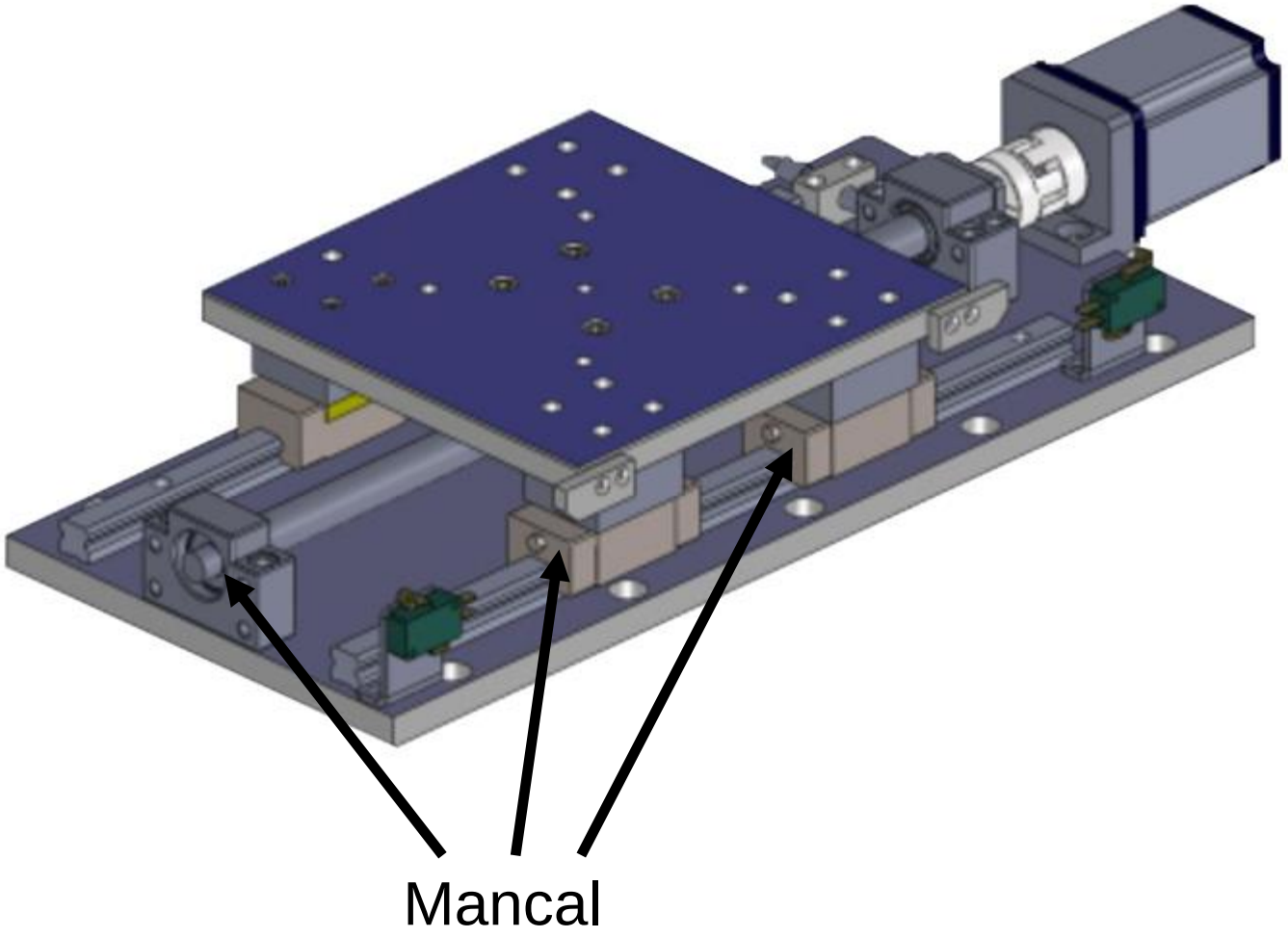


Mancal

Fuso (Eixo principal) de Máquina Operatriz (Torno)

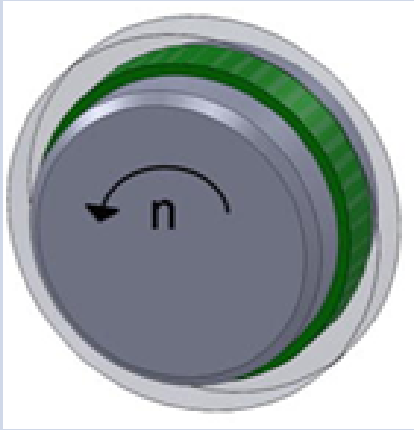
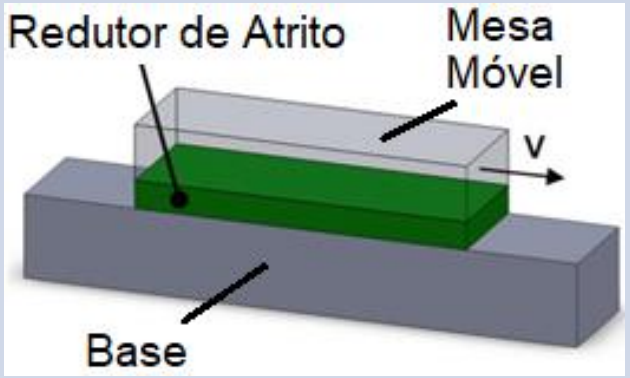
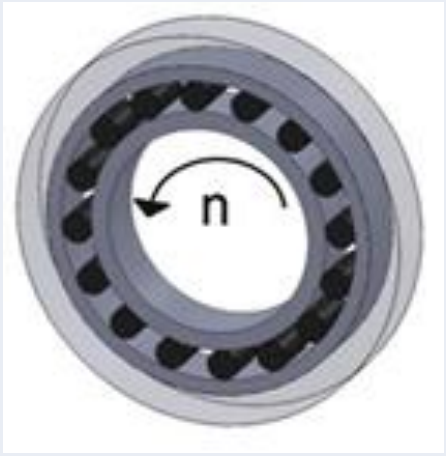
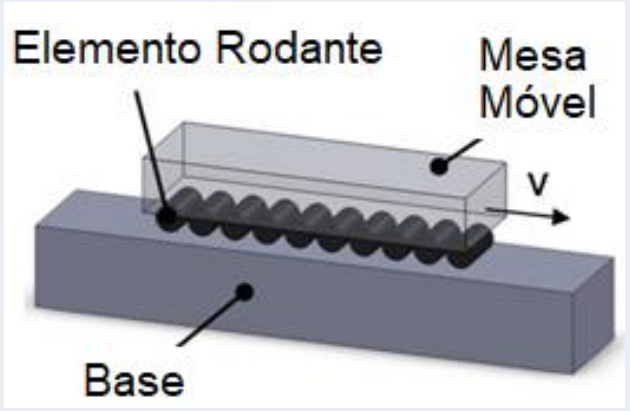


Mesa de Posicionamento Linear



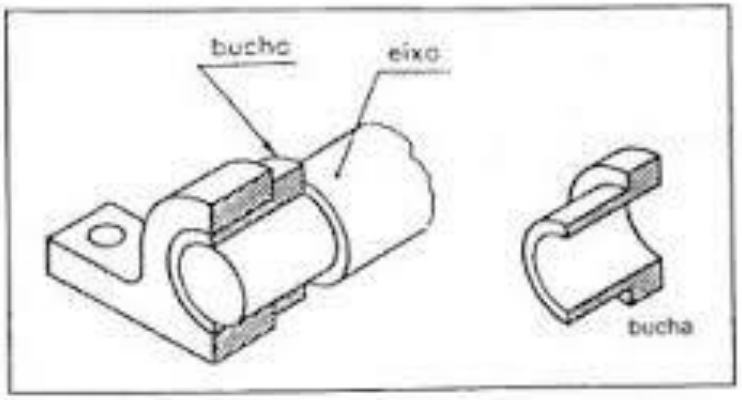
2. Classificação dos mancais

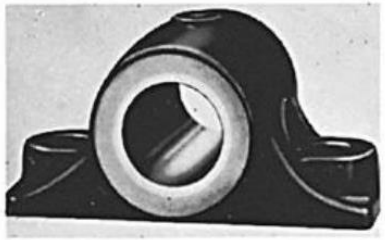
2.1 - Quanto ao tipo de movimento relativo entre as partes

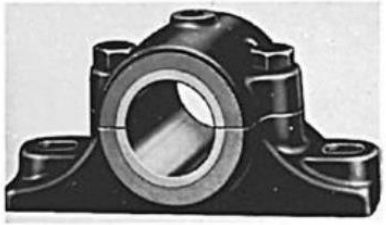
Tipo de mancal	Rotativo	Linear
Mancal de Deslizamento no ponto de contato velocidade relativa $V_{rel} \neq 0$ **(DIFERENTE DE ZERO)**		
Mancal de Rolamento no ponto de contato velocidade relativa $V_{rel} = 0$ **(IGUAL A ZERO)**		

Mancais de Deslizamento

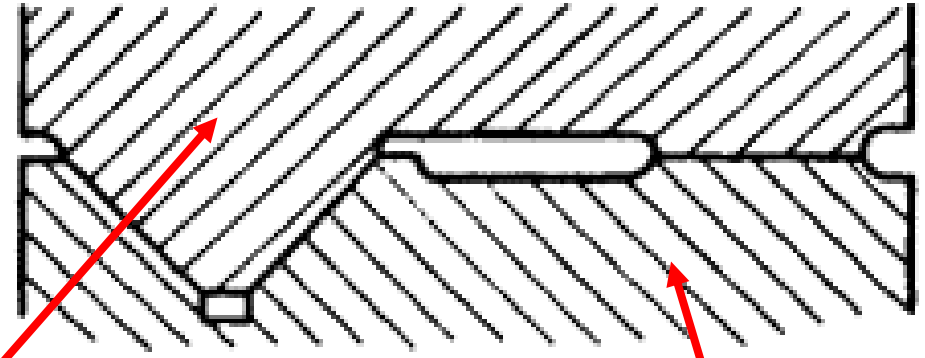
Mancal de Deslizamento Rotativo







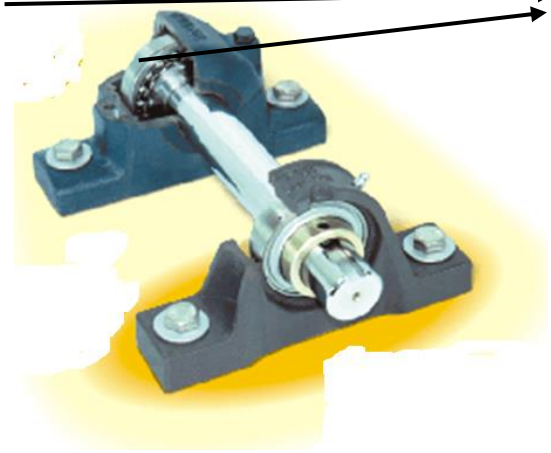
Mancal de Deslizamento Linear (Guia)



Mesa Móvel

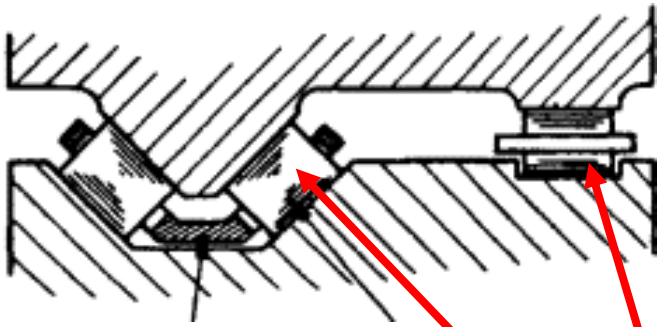
Base

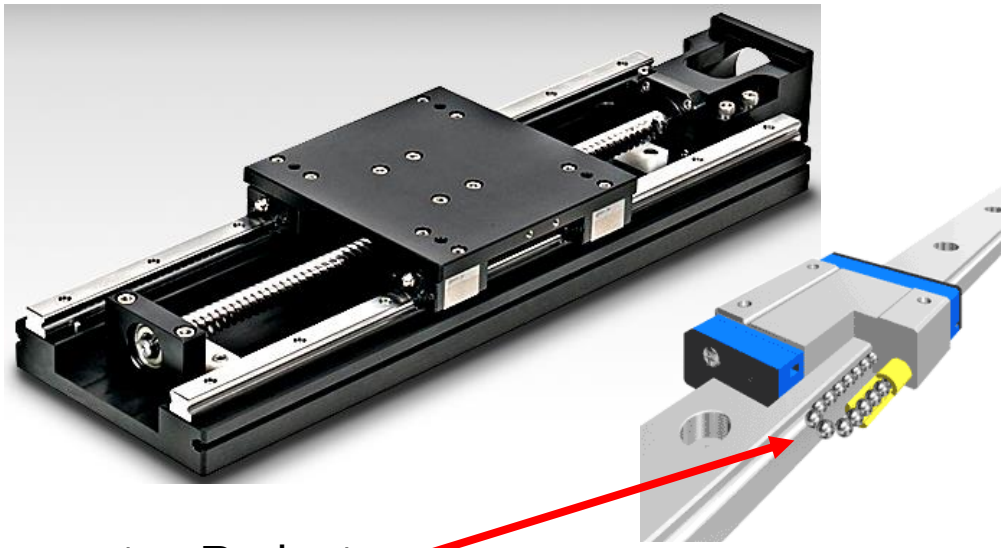
Mancais de Rolamento



Mancal de Rolamento Rotativo

Mancal de Rolamento Linear (Guia)



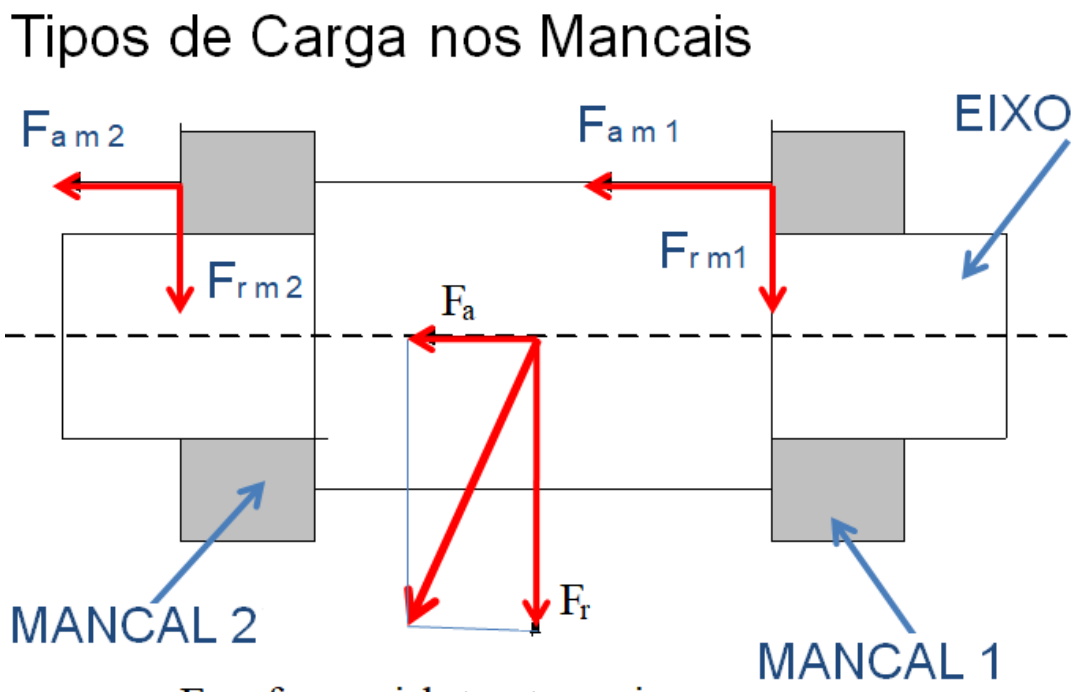


Elementos Rodantes

2. Classificação dos mancais

2.2- Quanto ao tipo de carga (força) resistida

- Radiais
- Axiais
- Mistos



F_a = força axial atuante no eixo

F_r = força radial atuante no eixo

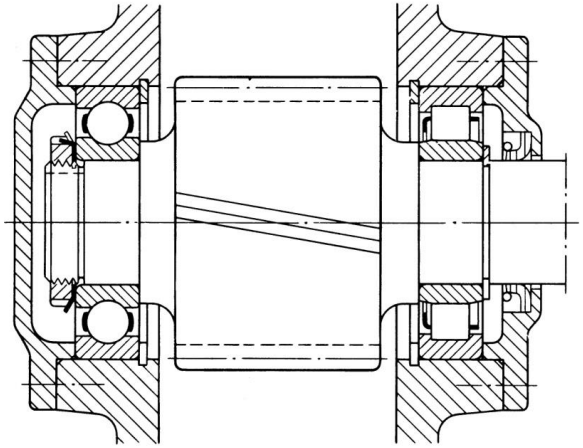
F_{am} = força axial atuante no mancal

F_{rm} = força radial atuante no mancal

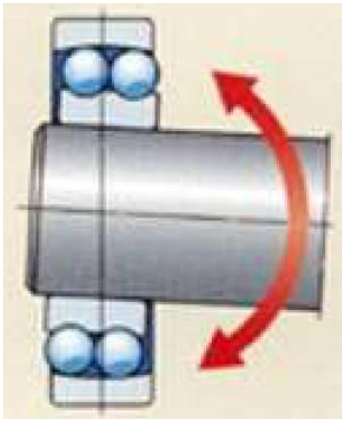
2. Classificação dos mancais

2.3 - Quanto à mobilidade do mancal em relação à estrutura

Rígidos



Autocompensadores



2.4 - Quanto ao tipo de lubrificação empregada

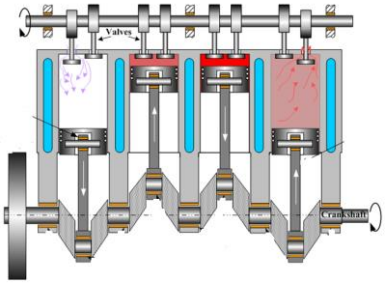
- *A "seco"*
- *Lubrificação Permanente (Auto-Lubrificado)*
- *Lubrificação Contínua*

3. Mancais de Deslizamento

no ponto de contato velocidade relativa $V_{rel} \neq 0$
(DIFERENTE DE ZERO)

- Foram os primeiros a ser desenvolvidos e utilizados pelo ser humano.
- Até hoje são muito utilizados:
  - os mais simples
  - baixo custo
  - altas capacidades de carga
  - atingem altas velocidades/rotações
  - baixo ruído/vibrações

3. Mancais de Deslizamento



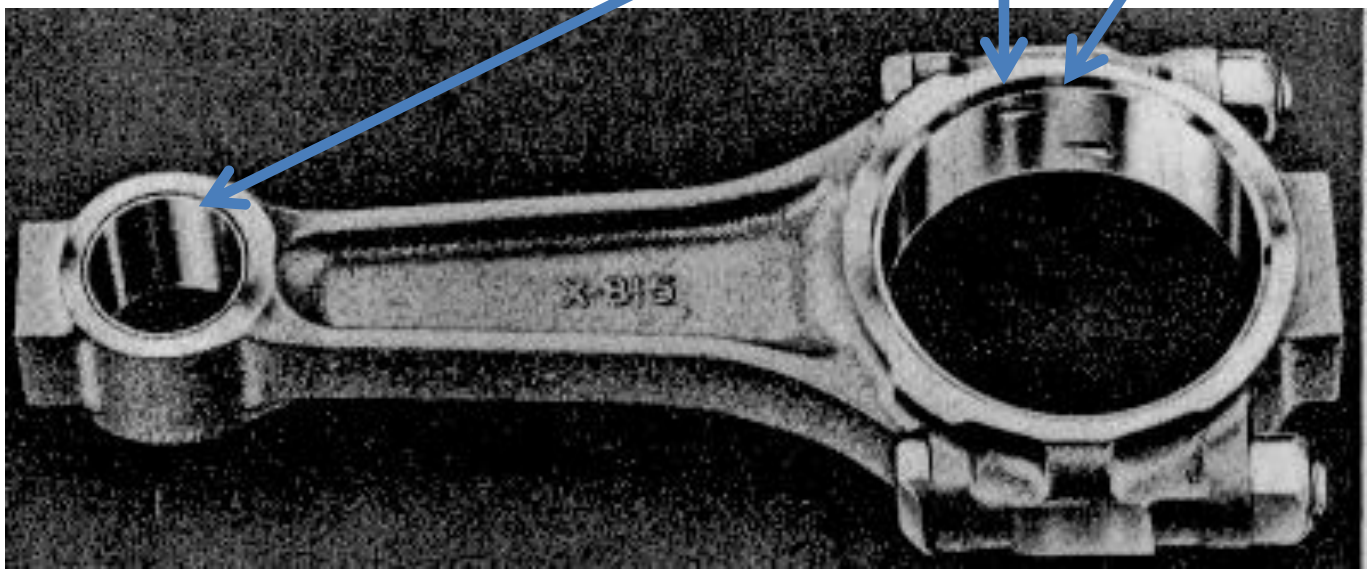
Podemos encontrar 38 mancais de deslizamento?

3. Mancais de Deslizamento (Luvas e Buchas)

MANCAIS DE DESLIZAMENTO

Bi- Partido

Biela – Motor de Combustão Interna
Mancais do Pino do Pistão e Girabrequim



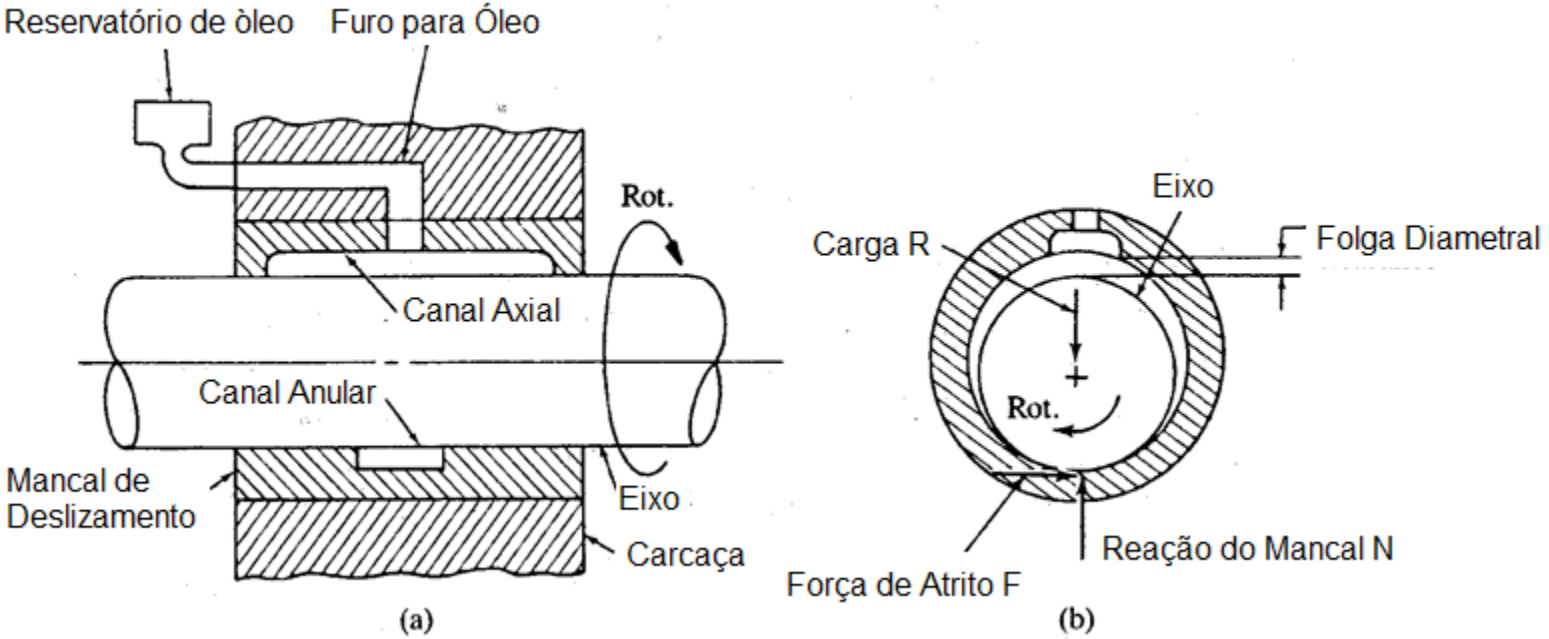
MANCAIS DE DESLIZAMENTO- LUBRIFICAÇÃO

- Os mancais de deslizamento usualmente utilizam um lubrificante como agente redutor de atrito, embora, em algumas situações possa haver contato “a seco”entre os componentes do mancal. Em função da forma de inserção do agente lubrificante, o mancal pode ser de deslizamento hidrodinâmico ou de deslizamento hidrostático.

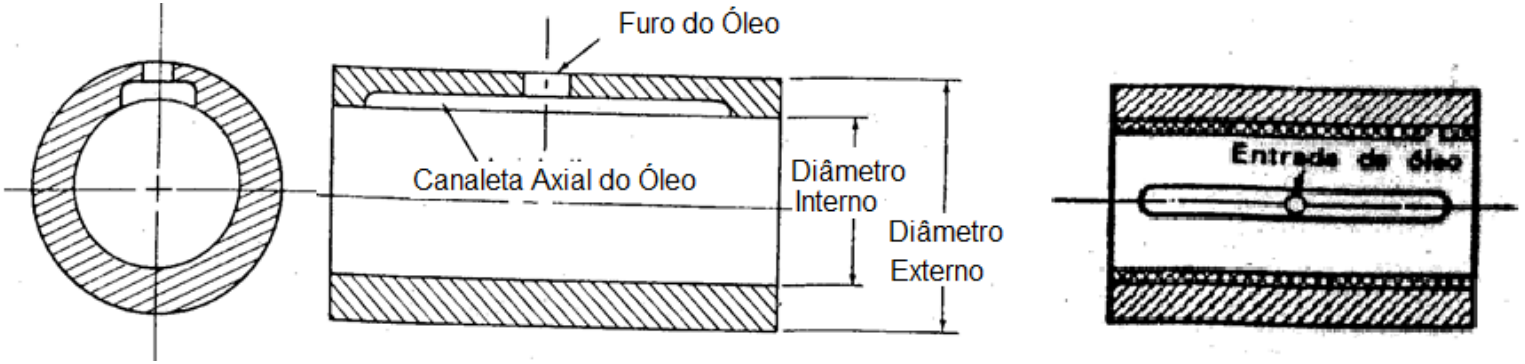
PROPRIEDADES DE UM LUBRIFICANTE

- Evitar o contato das partes em movimento
- Boa aderência às partes
- Suportar cargas de compressão
- Imunidade a variações de temperatura
- Dissipar bem o calor
- Não gerar espuma
- Proteger contra corrosão
- Prevenir contaminação do mancal
- Baixo risco sanitário e ambiental

3.1 - Configuração do Mancal de Deslizamento Hidrodinâmico



Luva – Mancal de Deslizamento

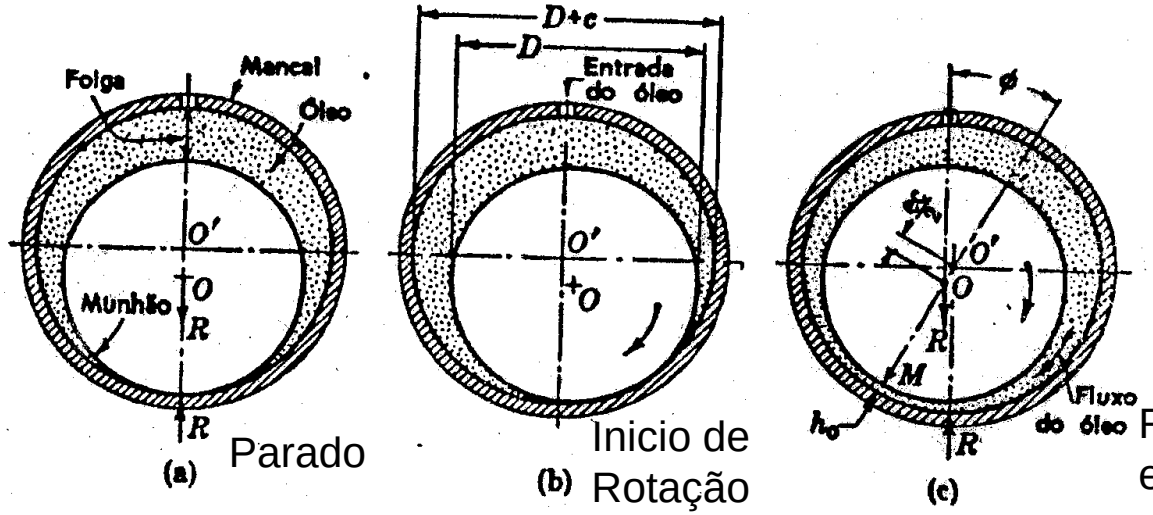


3.2- Operação do Mancal de Deslizamento Hidrodinâmico

A rotação do eixo induz uma distribuição de pressão no filme de óleo, a qual afasta o eixo da luva do mancal, sustentando-o, reduzindo o atrito na condição de operação.

O lubrificante deve ser constantemente inserido no interior do mancal, para repor o volume perdido pela suas extremidades.

Sequência de Operação do Mancal Hidrodinâmico

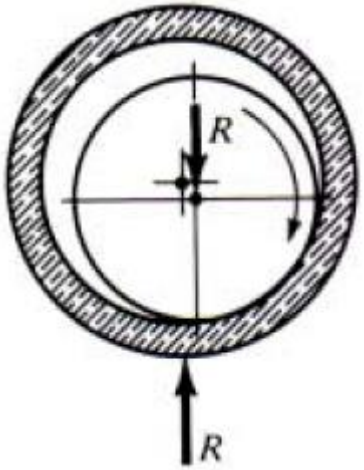


Parado

Inicio de Rotação

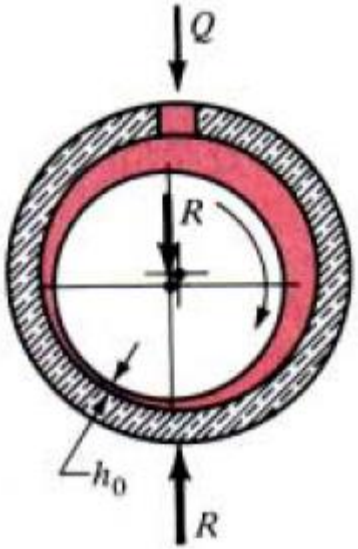
Rotação estável

Ação de Bombeamento no Mancal



Seco

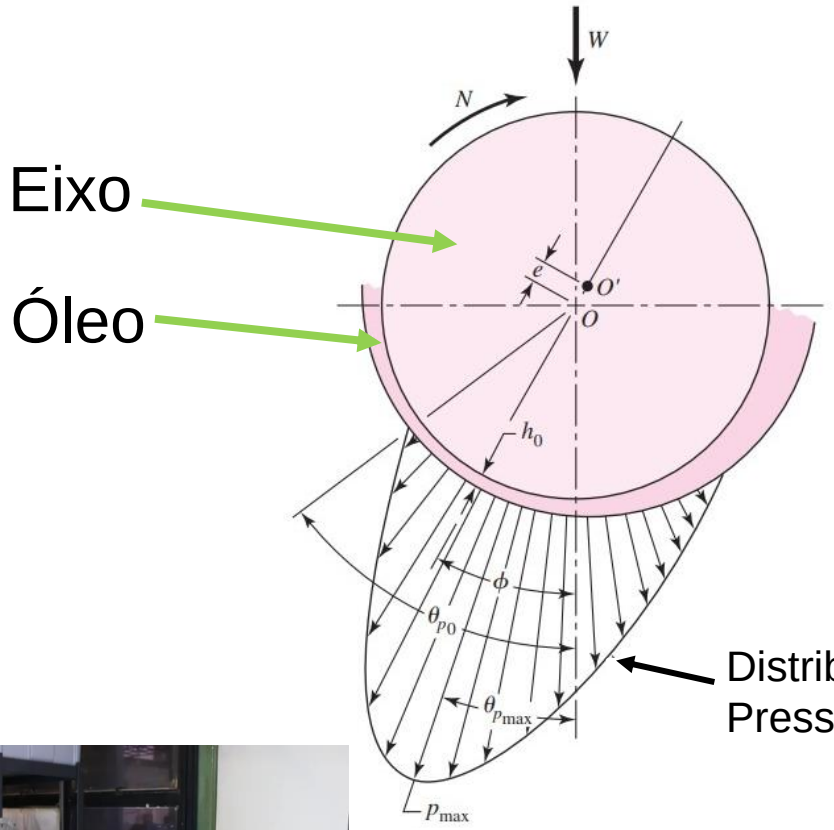
Quando seco, o atrito faz com que o eixo tente escalar a parece interna do mancal



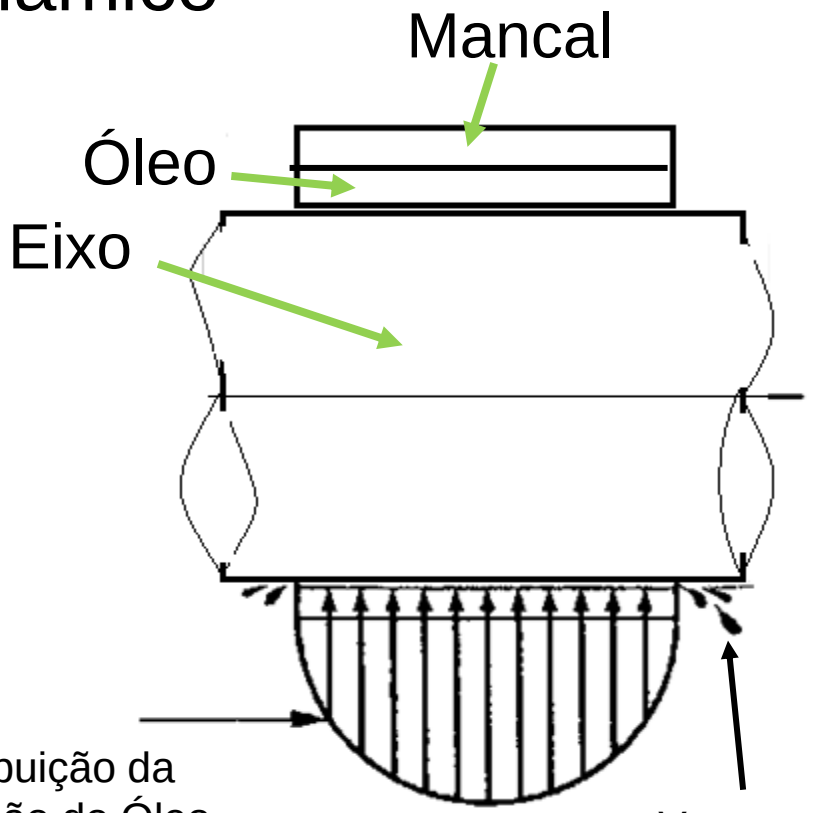
Lubrificado

Quando o lubrificante é introduzido, a ação de escalar a parede do mancal e a viscosidade do fluído farão com que o lubrificante seja forçado ao redor do eixo criando um filme entre o mancal e o eixo. A pressão do lubrificante empurrará o eixo para o lado.

Distribuição de Pressão de Óleo no Mancal Hidrodinâmico



Distribuição da Pressão do Óleo

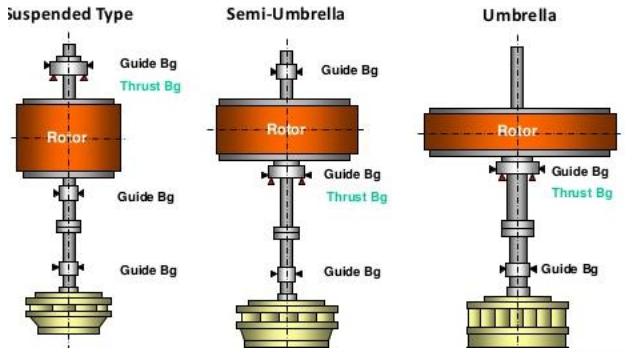


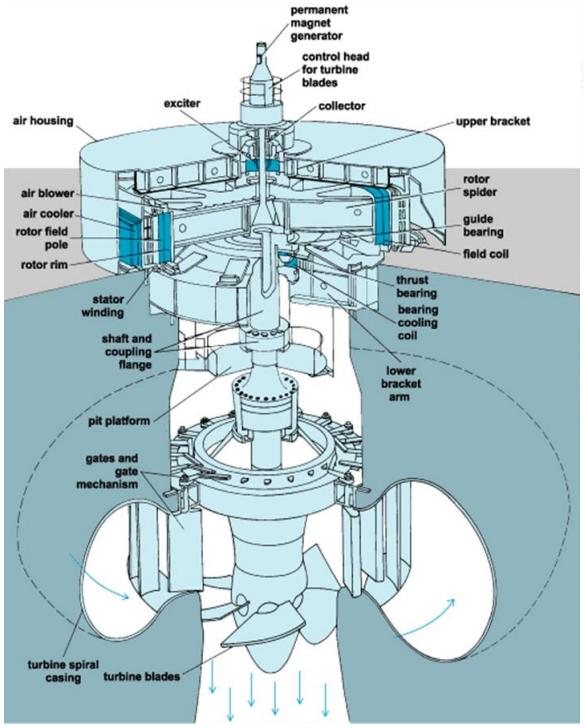
Vazamento pela Extremidade

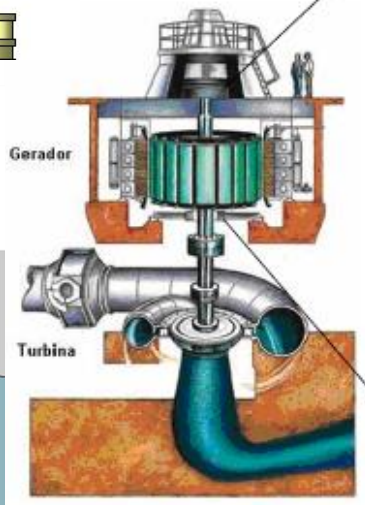
MANCAL DE DESLIZAMENTO

https://www.youtube.com/watch?v=7OY170iaGSA

Turbina e Gerador de Central Hidroelétrica

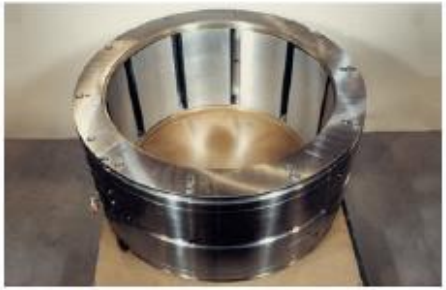




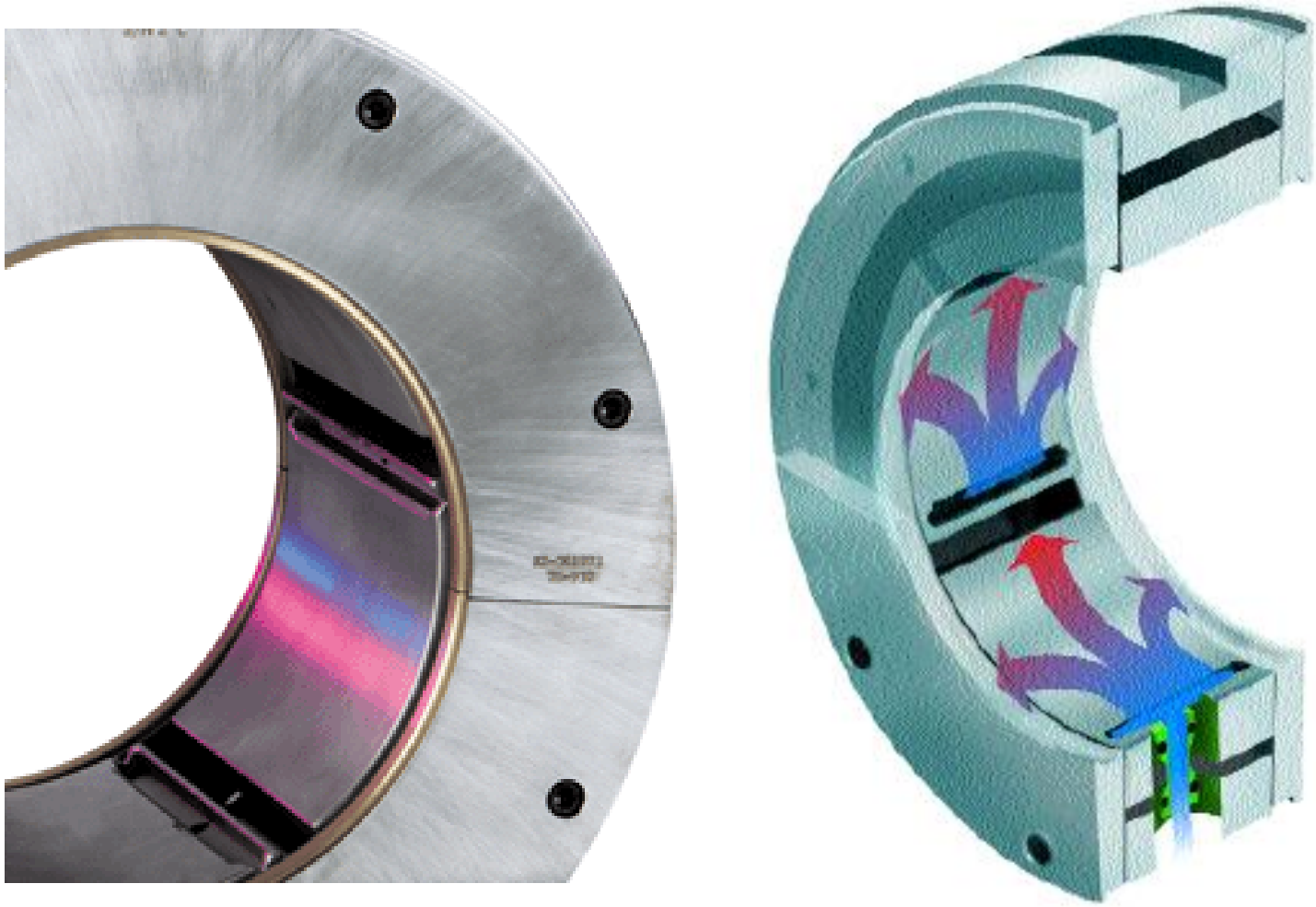


Mancal de Escora

Mancal Guia

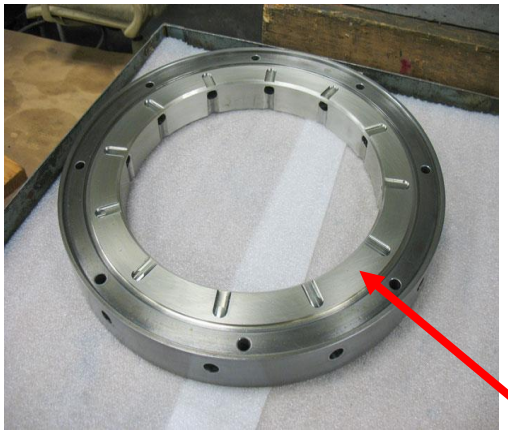


Mancal Hidrodinâmico Radial



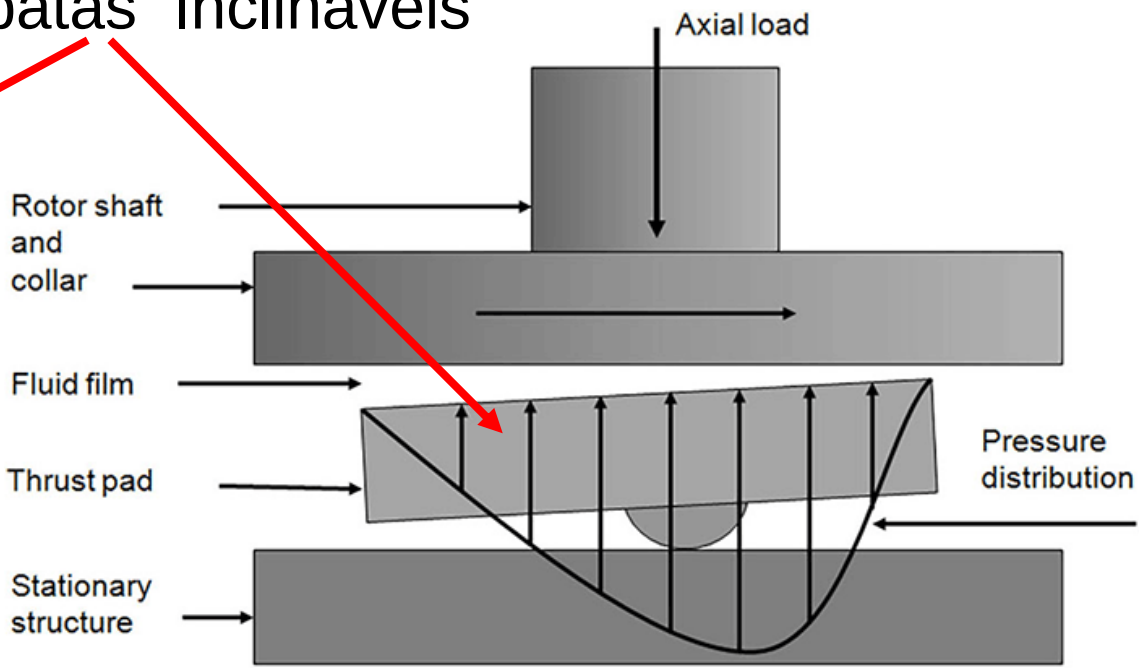
Kingsbury Inc

Mancal Hidrodinâmico Axial



Superfícies Fixas

Sapatas Inclináveis

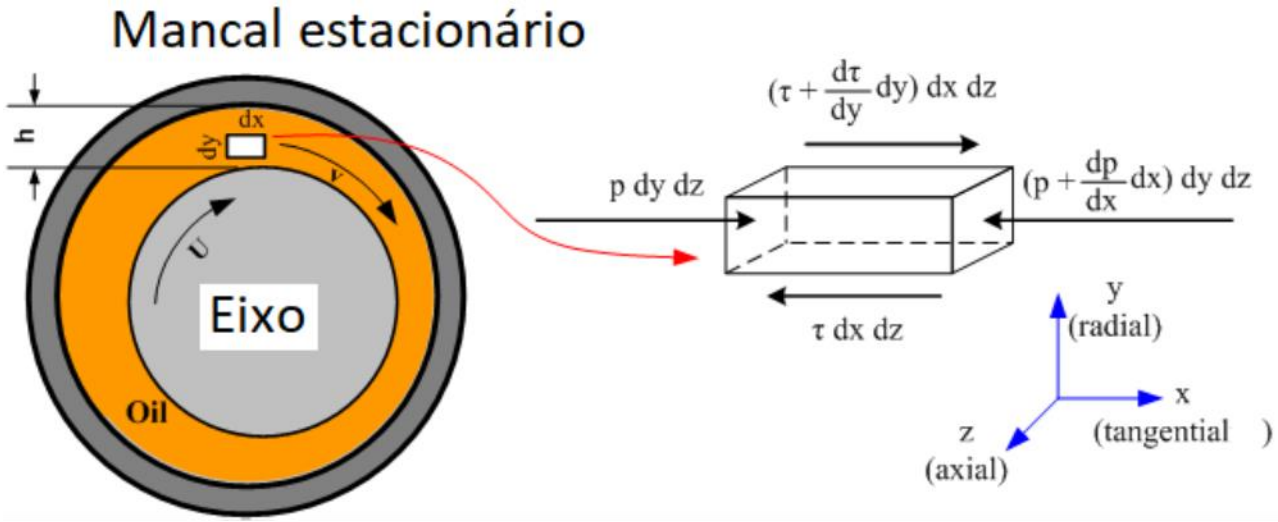


A GENERAL GUIDE TO THE PRINCIPLES, OPERATION AND TROUBLESHOOTING OF HYDRODYNAMIC BEARINGS Kingsbury, Inc.

3.3 - Determinação do Coeficiente de Atrito do Mancal de Deslizamento Hidrodinâmico

- O valor do coeficiente de atrito depende das condições de operação do mancal (carga atuante no mesmo, rotação do eixo, viscosidade do óleo lubrificante), bem como da geometria do mancal (comprimento, diâmetro, folga radial, entre outros).
- A determinação analítica é complexa, envolvendo solução de equação diferencial. Uma tentativa inicial de solução do problema foi proposta por Petroff.

Equação de Reynolds para escoamento no Mancal



$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right) = 6U\frac{\partial h}{\partial x}$$

Equação de Reynolds

Solução numérica gera Gráficos para cálculo dos mancais de deslizamento hidrodinâmicos

Viscosidade dinâmica

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

Unidades

ips

$$\frac{\frac{lb_f}{in^2}}{\frac{in}{sec\ in}} = \frac{lb_f - sec}{in^2} = reyn$$

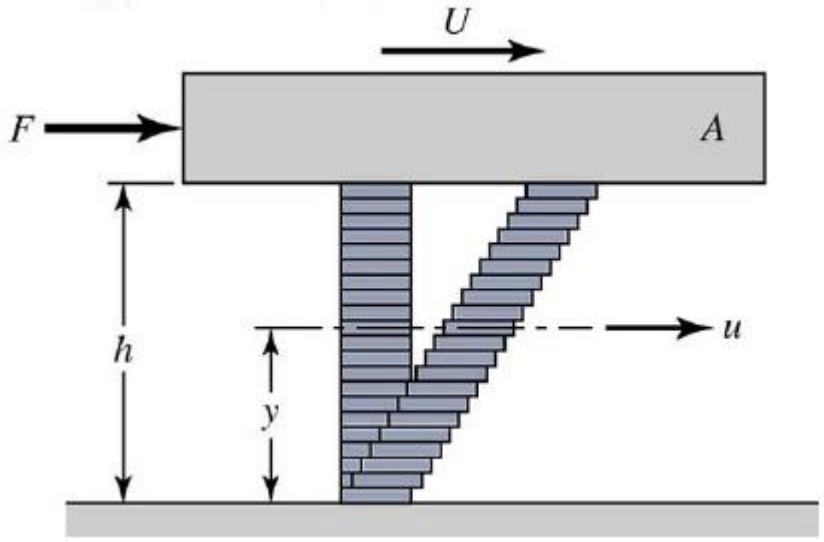
SI

$$\frac{\frac{N}{m^2}}{\frac{m}{sec\ m}} = \frac{N - sec}{m^2}$$

Lei de Petroff ou Equação de Petroff

- A Lei de Petroff pode ser utilizada para realizar a estimativa do coeficiente de atrito do mancal de deslizamento.
- Toma como hipótese que o eixo opera concêntrico com o mancal. Embora a hipótese esteja errada os resultados da análise permitem compreender os efeitos de algumas variáveis de projeto na operação do mancal.

Tensão de Cisalhamento no Fluído



Shigley

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

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

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

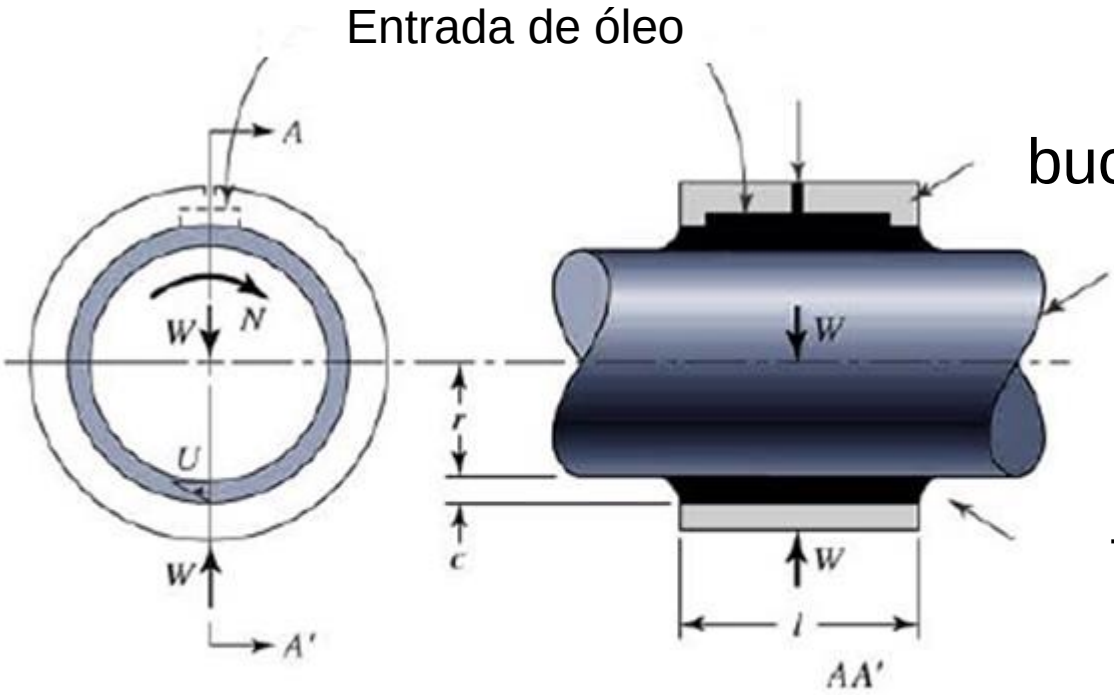
•A lei de Newton para fluidos viscosos estabelece que a tensão de cisalhamento no fluido é proporcional a taxa de variação da velocidade com respeito a y.

U – velocidade de deslocamento linear

μ - viscosidade dinâmica do fluido

$\boldsymbol{\tau}$ – tensão de cisalhamento no fluido

Mancal de Deslizamento Radial



bucha do mancal

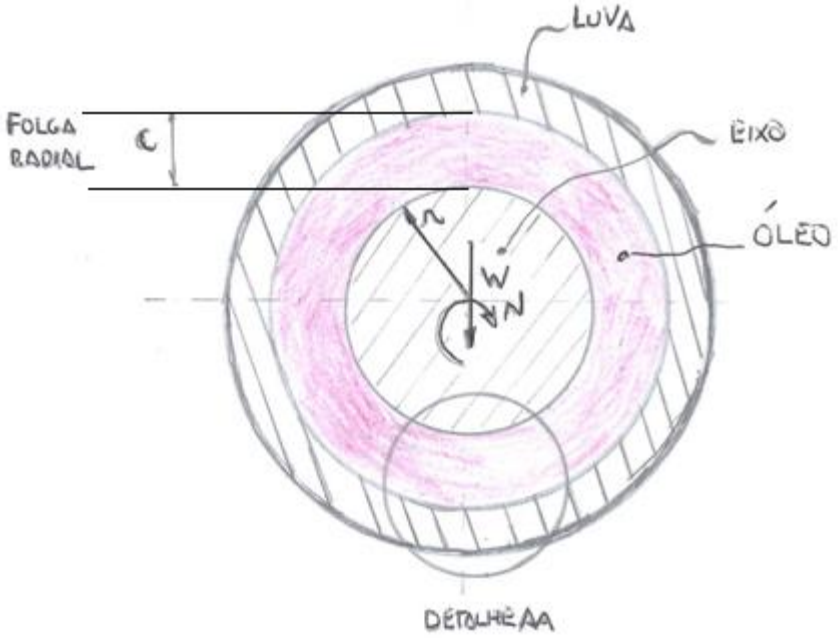
eixo

filme de óleo

Shigley's
Mechanical Engineering Design
Richard Budynas and Keith Nisbett

W – força radial atuante no eixo
l - comprimento do mancal
c – folga radial
r – raio do eixo
N – rotação do eixo
P – pressão por área projetada P=W/(2.r.l)
f – coeficiente de atrito

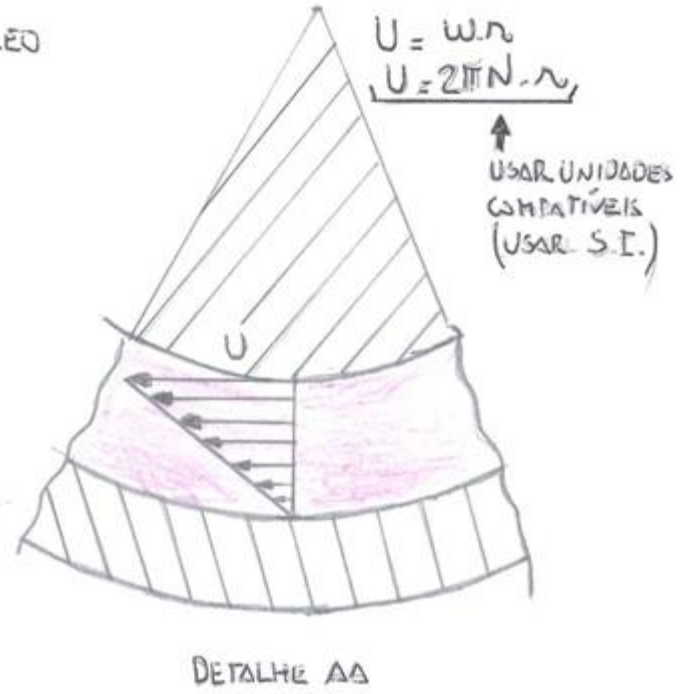
Detalhes do Mancal de Deslizamento



r ..raio do eixo (d=2.r)

N.. rotação do eixo

W.. força radial atuante no eixo



Equação de Petroff

Hipóteses
- Fluído Newtoniano: $\frac{du}{dy}=\frac{U}{h}$ $\quad \tau = \mu\frac{U}{h} = \mu\frac{2\cdot\pi\cdot r\cdot N}{c}$
- Eixo concêntrico com mancal
- Baixa carga

Força necessária para cisalhar o filme de óleo

$$F = \tau \cdot A \qquad A = 2 \cdot \pi . r . l$$

Torque para cisalhar o filme de óleo

$$T = F \cdot r = \tau \cdot A \cdot r = \frac{4\cdot\pi^2\cdot r^3\cdot l\cdot\mu\cdot N}{c} \qquad (1)$$

Carga W gera pressão $P = \frac{W}{2\cdot r\cdot l}$ ou $W = 2 \cdot r \cdot l \cdot P$

Torque criado pela força de atrito $f \cdot W$

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

Igualando (1) e (2)

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

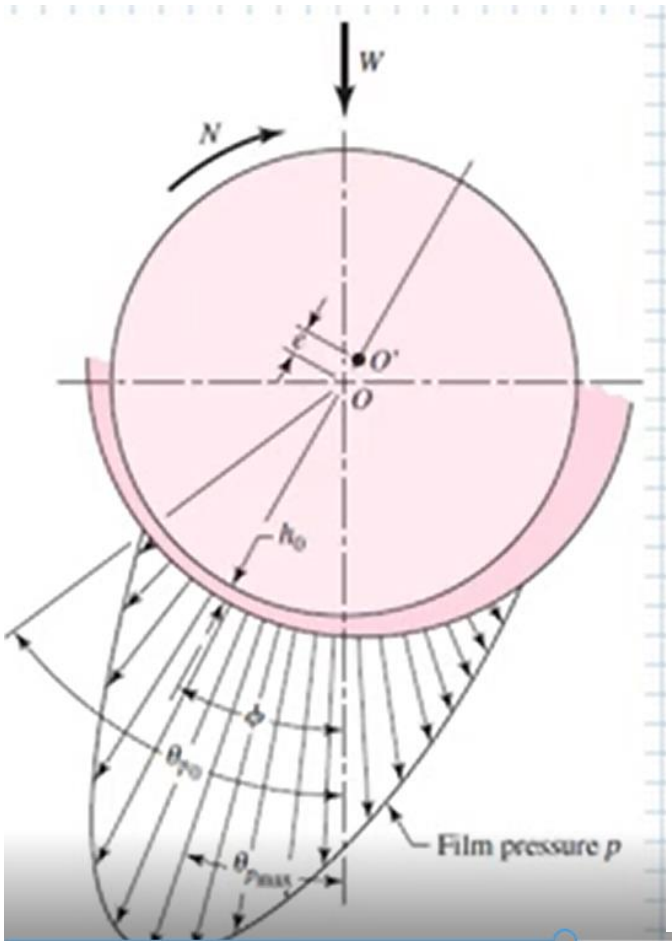
$$\boxed{f = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\mu\cdot N}{P} \cdot \frac{r}{c}}$$

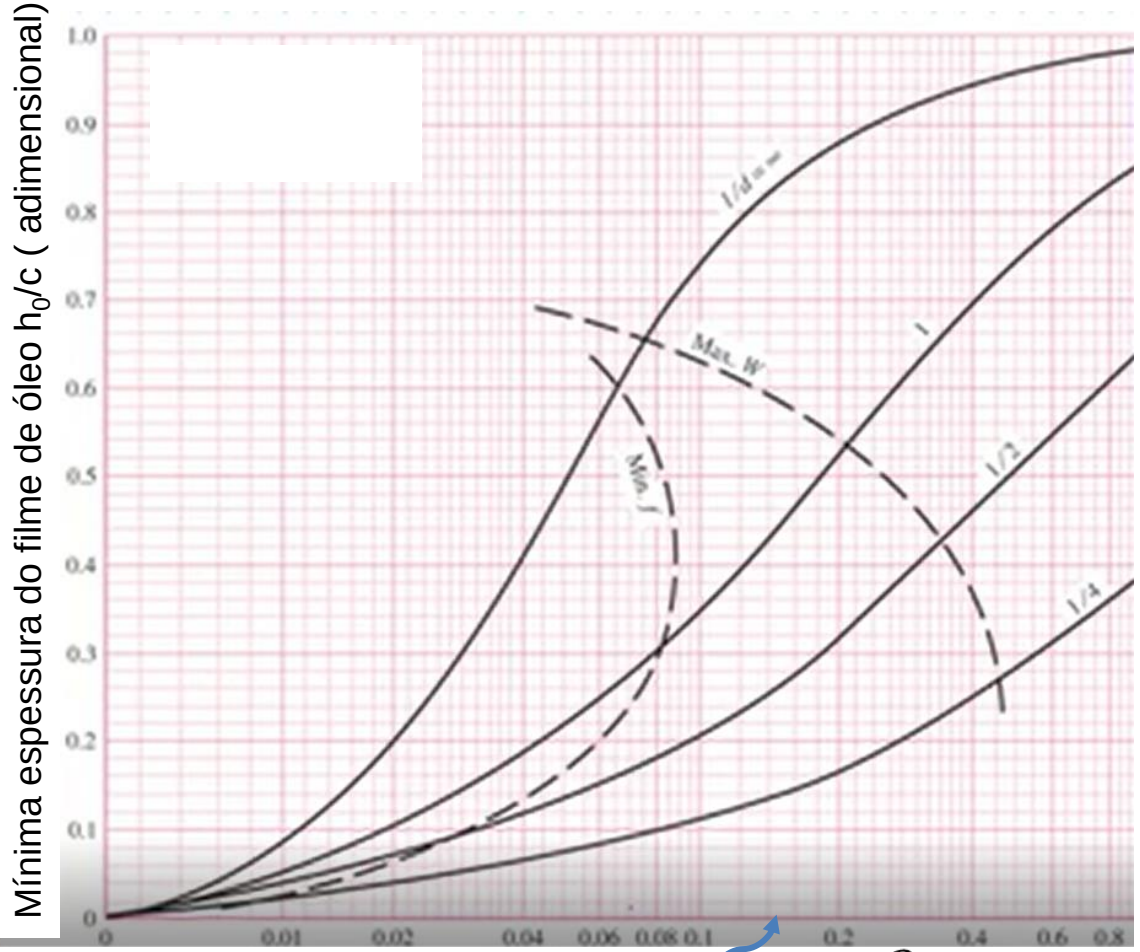
Equação de Petroff

Adimensionais $\frac{\mu.N}{P}$ e $\frac{r}{c}$

Número de Sommerfeld (adimensional) $S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \frac{\mu \cdot N}{P}$

Solução Numérica Paramétrica da Equação de Reynolds

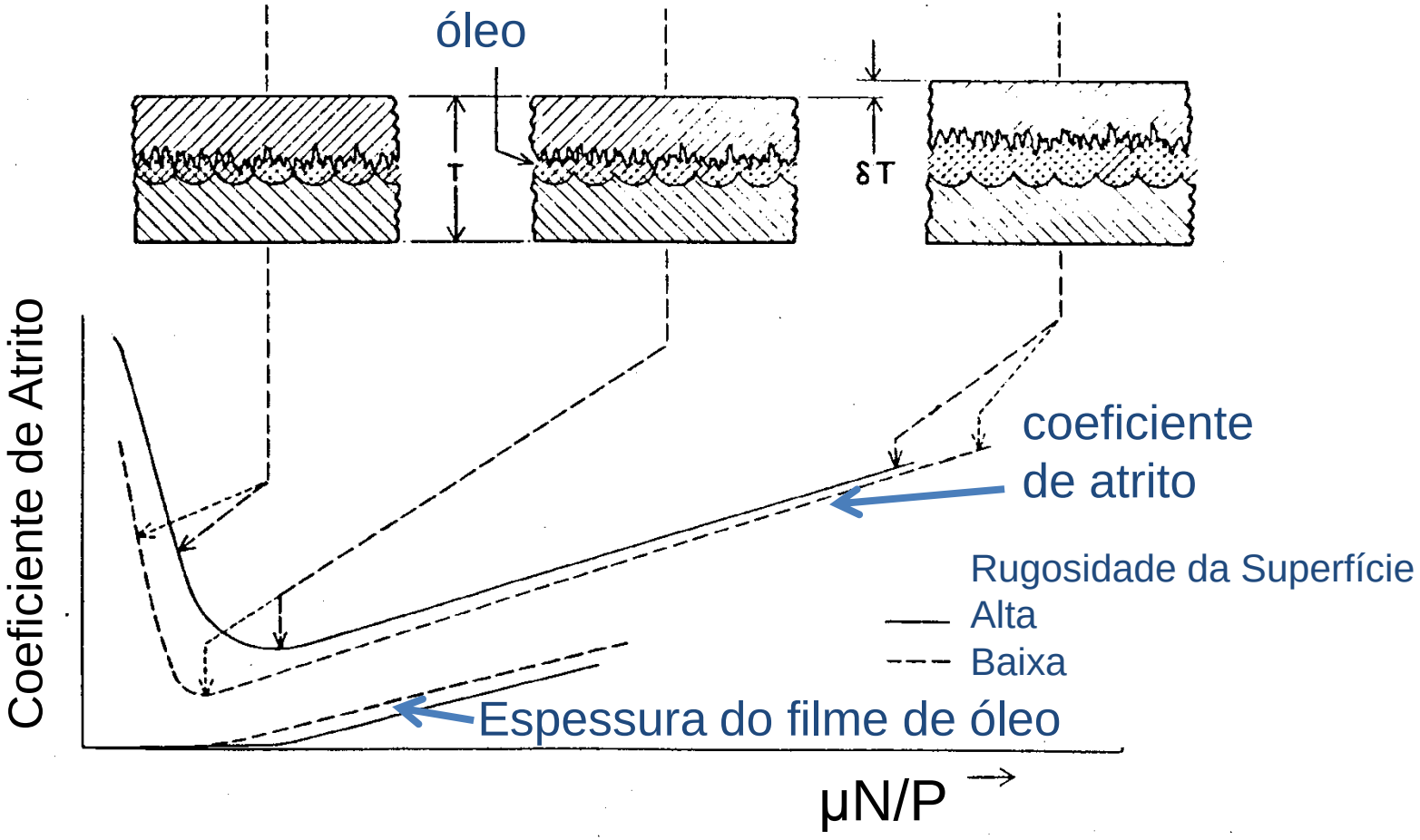




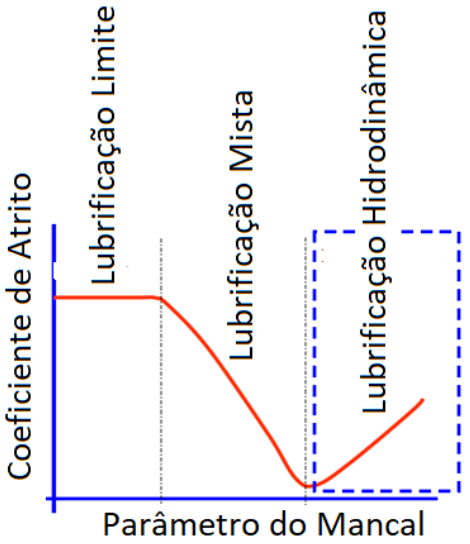
$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \frac{\mu \cdot N}{P}$$

"Shigley´s Mechanical Engineering Design",
Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, 2011

Variação do coeficiente de atrito como função das condições operacionais do mancal hidrodinâmico



Regimes de lubrificação do mancal hidrodinâmico



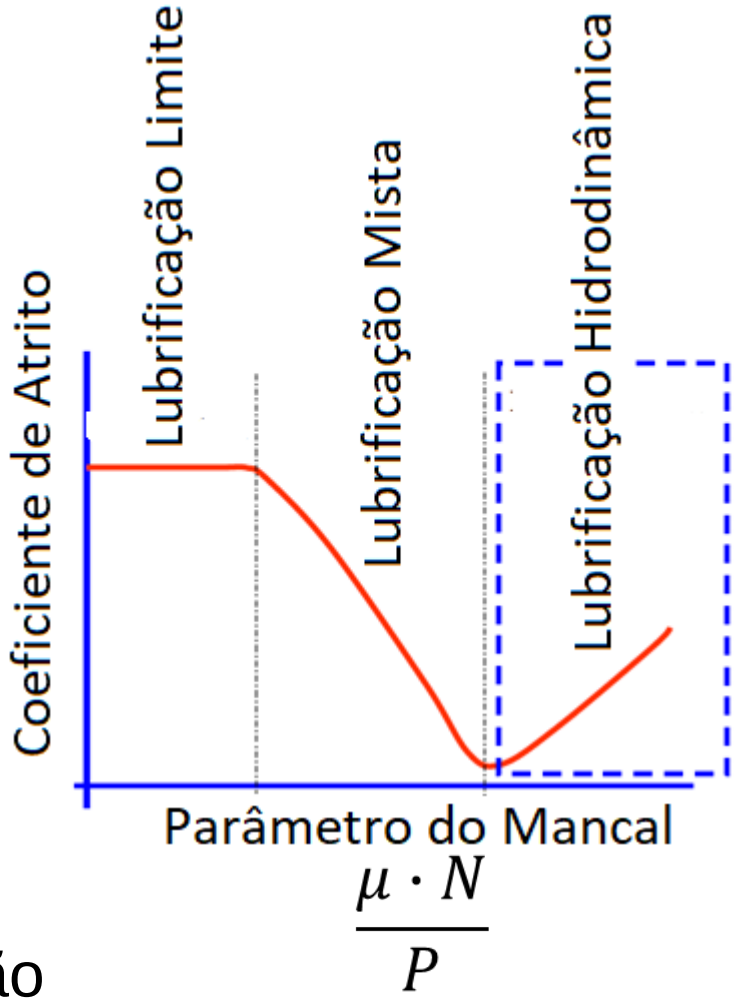
- **Lubrificação Limite**: o filme de óleo lubrificante não tem espessura suficiente para separar as superfícies do eixo e da luva do mancal, havendo contato entre as mesmas, sendo o coeficiente de atrito elevado. Há grande desgaste dos componentes (eixo e luva).
- **Lubrificação Mista** (regime de transição): a pressão de óleo é suficiente para sustentar parcialmente a carga, havendo a separação parcial das superfícies, mas não o suficiente para evitar o contato eixo luva.
- **Lubrificação Hidrodinâmica:** ocorre a total separação entre as superfícies do eixo e da luva, sendo a condição ideal de operação dos mancais hidrodinâmicos.

Lubrificação Estável e Instável

Lubrificação Hidrodinamica é normalmente chamada de lubrificação estável

Se a temperatura da lubrificação aumenta a viscosidade diminui. Isto resulta em um coeficiente de atrito menor, o que causa a diminuição da temperatura da lubrificação (auto correção)

Lubrificação Mista é instável- um aumento da temperatura de lubrificação causa mais aumento da temperatura



3.4 - Variáveis Importantes no Projeto de Mancais de Deslizamento Hidrodinâmico

- Carga atuante no mancal
- Relação comprimento/diâmetro do mancal
- Folga diametral
- Rugosidade superficial
- Tipo de lubrificante

3.5 – Coeficiente de Atrito nos Mancais de Deslizamento Hidrodinâmico

- Em baixas velocidades não ocorre a formação do filme lubrificante e o Coeficiente de Atrito $f \sim 0,1$ – Lubrificação Limite.
- Com o aumento da velocidade, atingida a Lubrificação Mista, o Coeficiente de Atrito varia de $0,004 < f < 0,10$.
- No regime hidrodinâmico $0,002 < f < 0,010$.
- A espessura mínima do filme de lubrificante varia de 0,008mm a 0,02 mm.

3.6 - Materias para Mancais de Deslizamento

- *Propriedades necessárias*: resistência mecânica, baixa incrustabilidade, resistência à corrosão;
- *Materias mais utilizados para as luvas*:

  bronze
  metal patente (Pb + Sn + Sb)
  alumínio
  metais porosos (Sinterizados)
  plásticos (PTFE-politetrafluoretileno, PA-poliamida, POM-polioximetileno, PVC-polivinilcloreto etc)

Isac Babbitt (metal branco)

- 90% estanho 10% cobre
- 89% estanho 7% antimonio 4% cobre
- 80% chumbo 15% antimonio 5% estanho

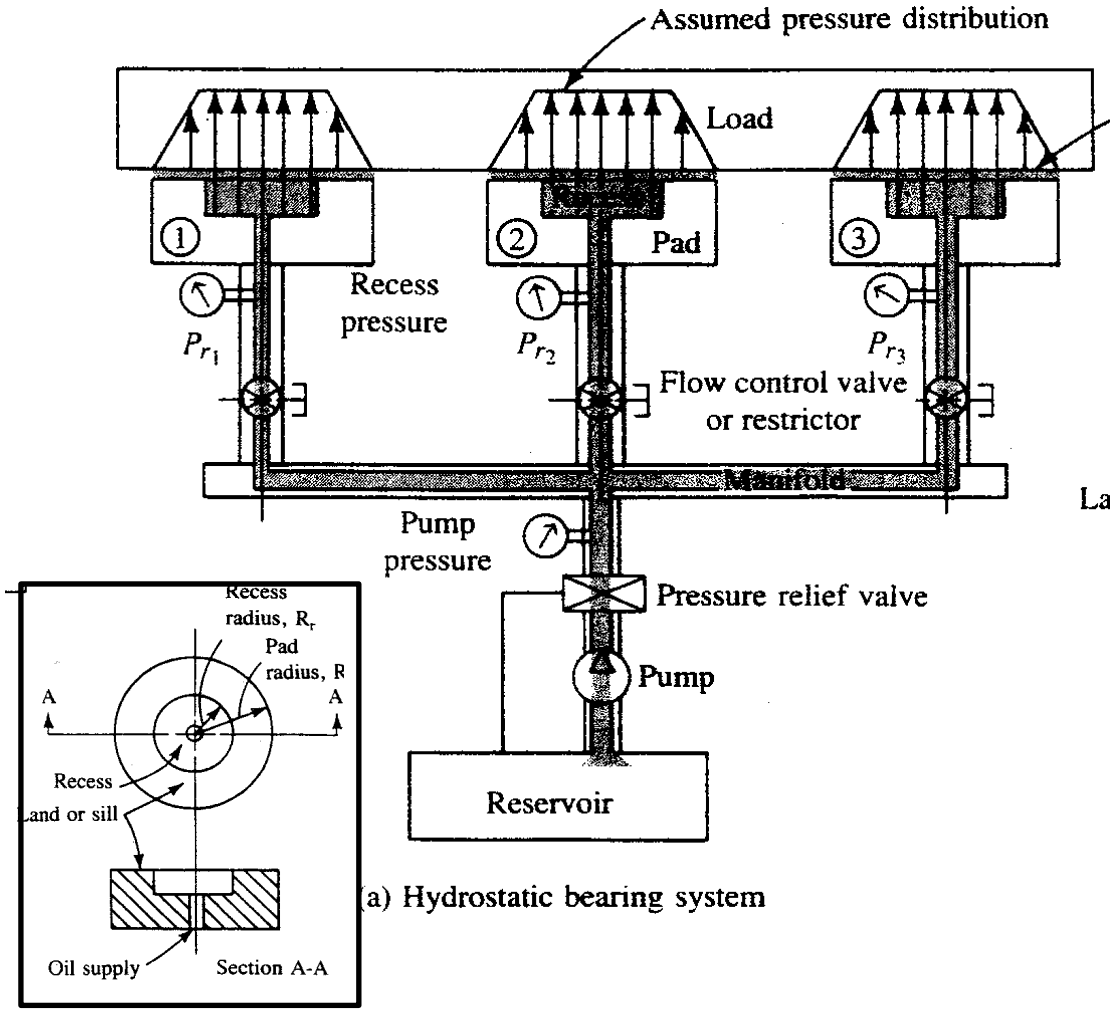
Desgaste do Mancal de Deslizamento (Metal Patente)

3.7 - Mancal de Deslizamento Hidrostático

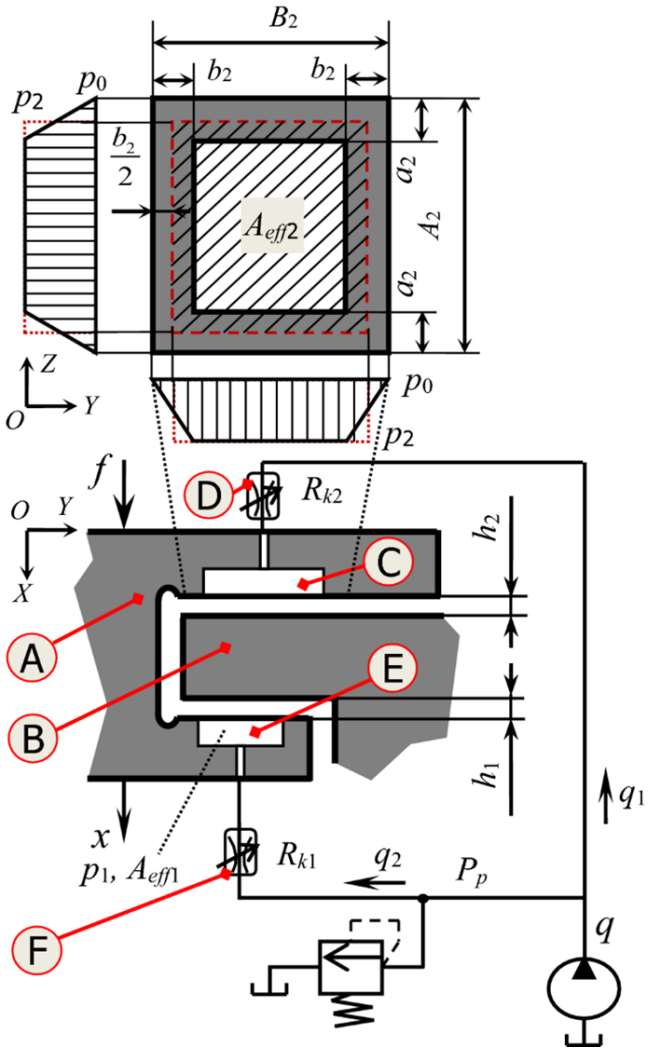
- O desempenho do mancal está associado com a formação de um filme de óleo, injetado sob pressão, entre o mancal e o eixo em movimento de rotação.
- Neste mancal há a necessidade de utilização de um sistema de pressurização de óleo, tornando-o mais caro que o mancal de deslizamento hidrodinâmico.
- É mais adequado para máquinas que sofrem paradas e partidas com grande frequência, sendo o mancal submetido a cargas elevadas.

3.7- Mancal de Deslizamento Hidrostático

Mancal de Deslizamento Hidrostático Plano- Guia

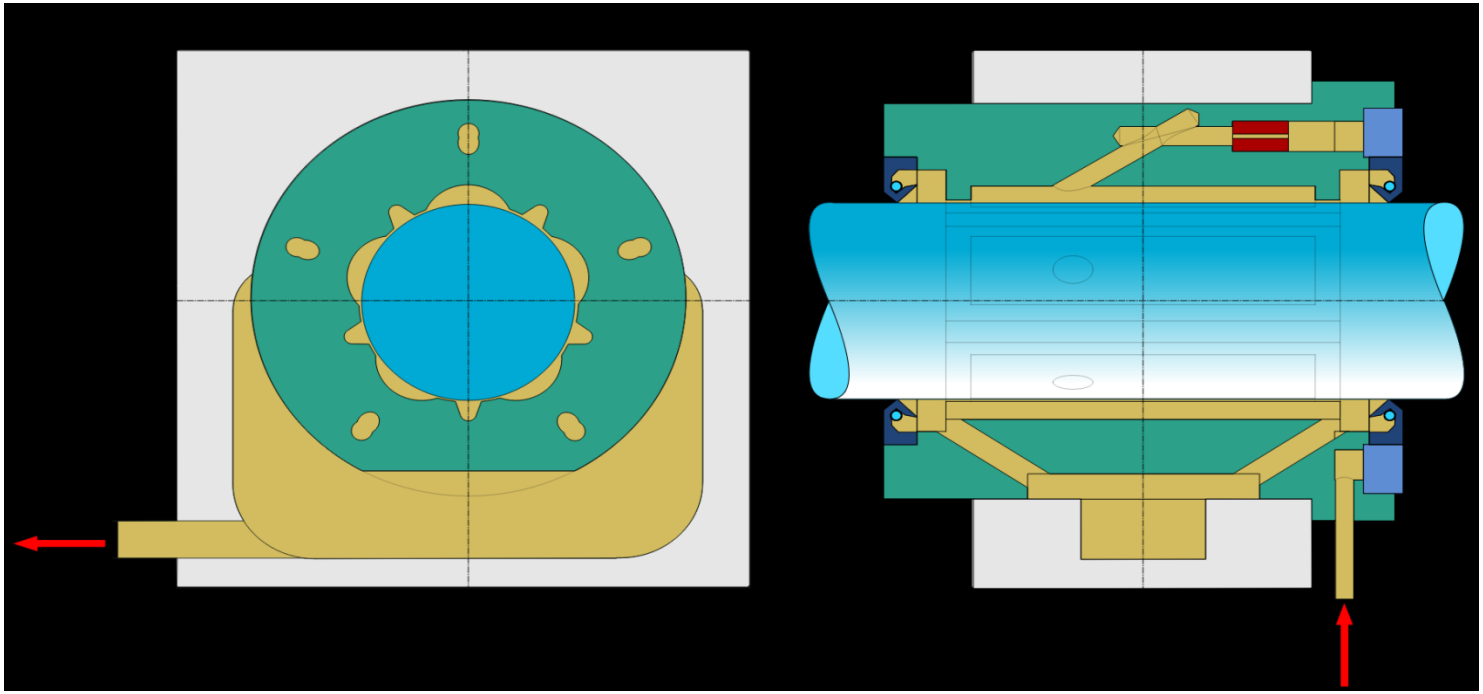


(a) Hydrostatic bearing system



3.7- Mancal de Deslizamento Hidrostático

Mancal de Deslizamento Hidrostático Radial



Saída de óleo

Entrada de óleo pressurizado

4. Mancal de Deslizamento a Ar - Aerostático

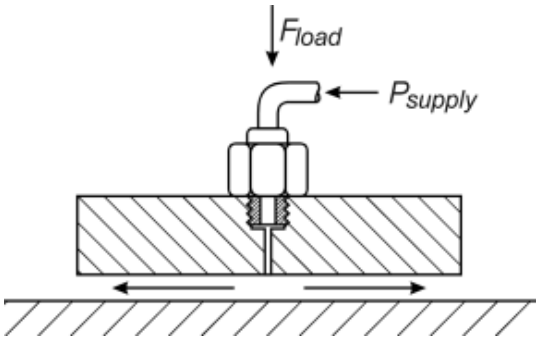
- É um tipo de mancal lubrificado a filme de ar, com espessura de filme de ar que varia de 5 a 30 micrometros.

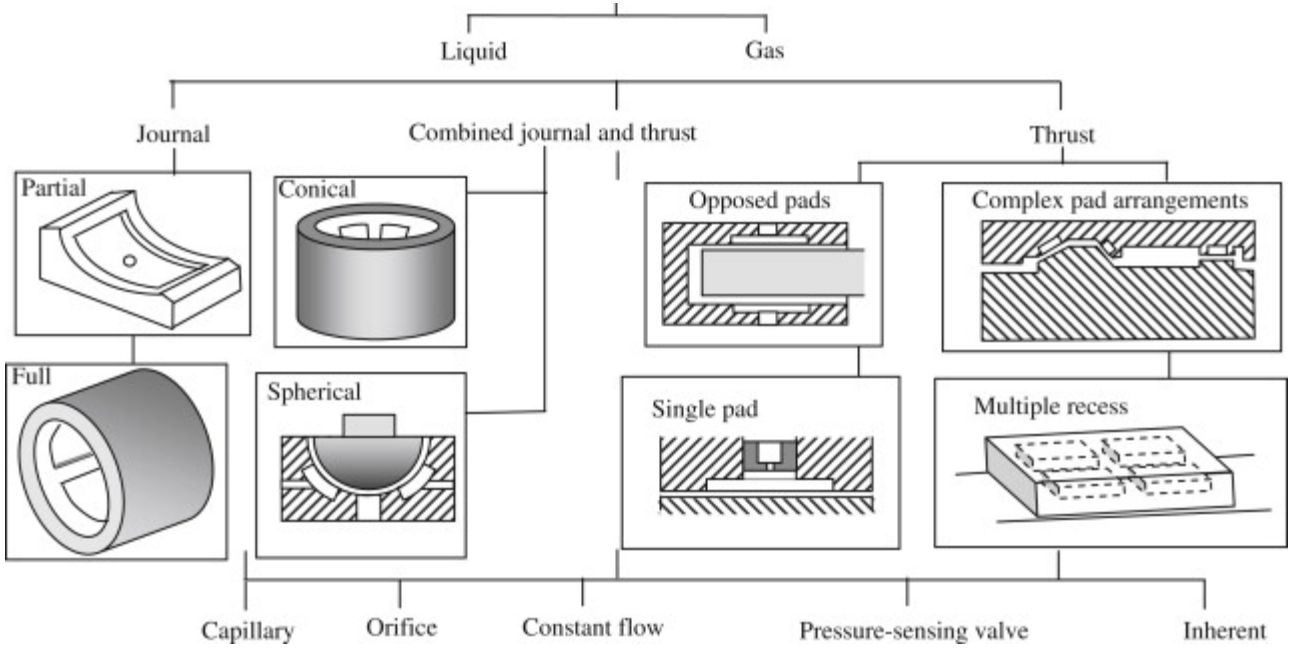
- As duas superfícies são intercaladas por uma camada de ar comprimido (fornecido por um ou mais bocais no mancal), que servirá para separar as superfícies.

- Hirn, em 1854, falou do ar como possível lubrificante, sendo que o primeiro mancal a ar foi criado por Albert Kingsburry, em 1887. A aplicação em máquinas teve maior desenvolvimento após o final da Segunda Guerra Mundial devido à demanda das indústrias de geração de energia com combustível nuclear.

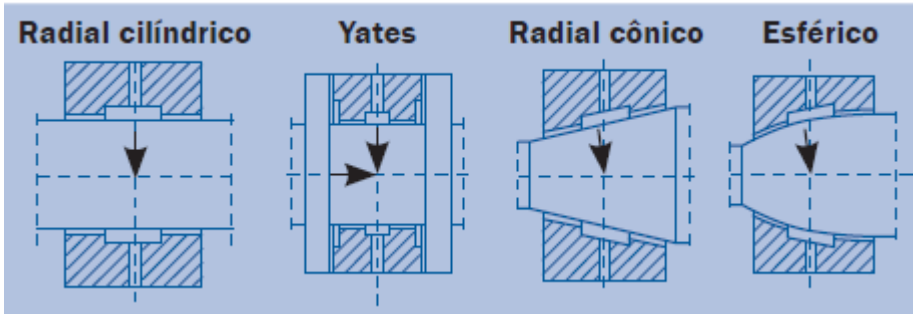
Mancais de Deslizamento a Ar - Aerostático

Mancais Pressurizados Externamente

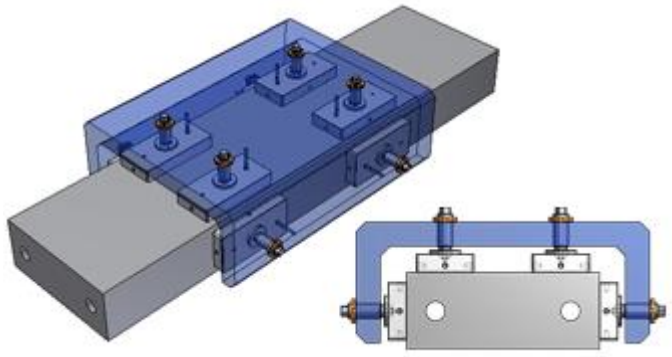




Configurações



Guia com mancal aerostático



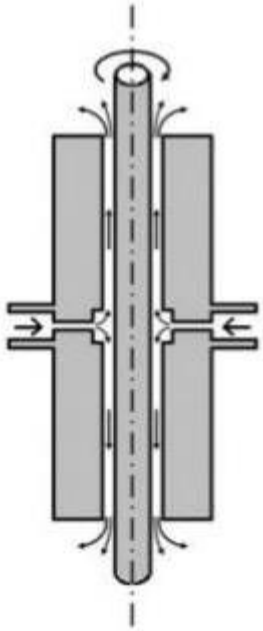
https://www.youtube.com/embed/l2B12U6NtQw?rel=0

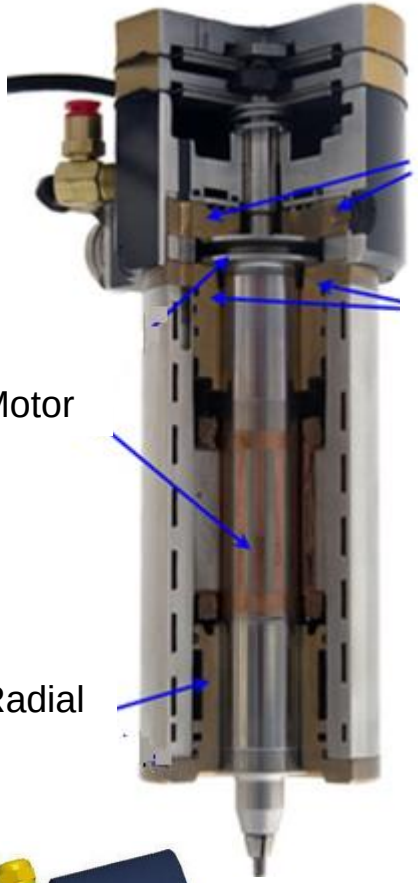
Vantagens do Mancal de Deslizamento a Ar

Os mancais a ar ou aerostáticos, pressurizados externamente, oferecem muitas vantagens, sendo as mais conhecidas:

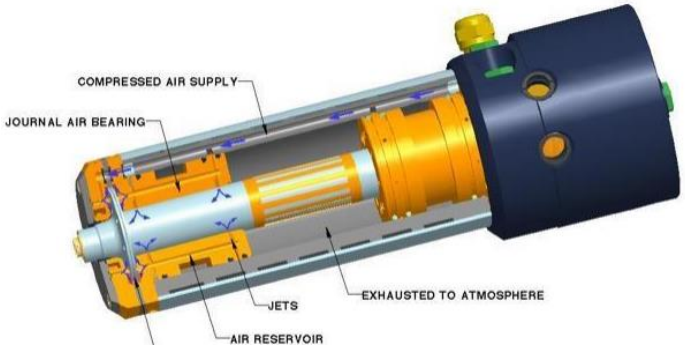
- atrito de partida nulo e atrito viscoso muito pequeno;
- geração de calor desprezível, mesmo a altas velocidades;
- ausência de desgaste, pois as peças do mancal não estão em contato;
- possibilidade de ser utilizado onde a contaminação dos materiais deve ser evitada;
- não há necessidade de equipamentos para coleta e retorno do ar para uso posterior.
- mancais lubrificados a ar são normalmente utilizados em aplicações que exigem altas velocidades e precisões

Fuso Aerostático de Alta Velocidade para Máquina Operatriz





Máquina da Toshiba (UVM-450C) para usinagem de substratos cerâmicos e de vidro.



https://www.celeramotion.com/westwind/products/pcb-drilling-and-routing/

Referências para Mancais de Deslizamento

- www.kingsbury.com
- www.engineering.com
- www.machinerylubrication.com
- www.skf.com
- https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=engine_bearing_failure
- “Shigley´s Mechanical Engineering Design”, Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, 2011