



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

# **Introdução aos Elementos de Máquinas**

**PMR 3320 – A12**

**Mancais**

**2020.2**



## Planejamento

Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
17.08	2ª	A1	<b>Introdução a disciplina</b> Modelagem, carregamento e equilíbrio	RS
24.08	2ª	A2	Composição de tensões Estado plano de tensões – Círculo de Mohr	RS
31.08	2ª	A3	Composição de tensões Diagramas de esforços	RS
07.09	2ª	---	<b>Feriado – Independência do Brasil</b>	
14.09	2ª	A4	Teorias de Falha: 2) Falha por deformação permanente: von Mises, Tresca, Coulomb-Mohr	RS
21.09	2ª	A5	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga	RS
28.09	2ª	A6	Fixações cubo-eixo	NG
05.10	2ª	A7	Dimensionamento de Eixos	NG
12.10	2ª	---	<b>Feriado – Dia da Criança</b>	
19.10	2ª	A8	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Rebites	NG
26.10	2ª	A9	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos	NG
02.11	2ª	---	<b>Feriado – Finados</b>	
09.11	2ª	A10	Especificação e dimensionamento de elementos de transmissão: Fusos	RS
16.11	2ª	A11	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens	RS
23.11	2ª	A12	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais	RS
30.11	2ª	A13	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas	NG
07.12	2ª	A14	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Acoplamentos e embreagens	NG
14.12	2ª		<b>Encerramento do semestre 2020-2</b>	

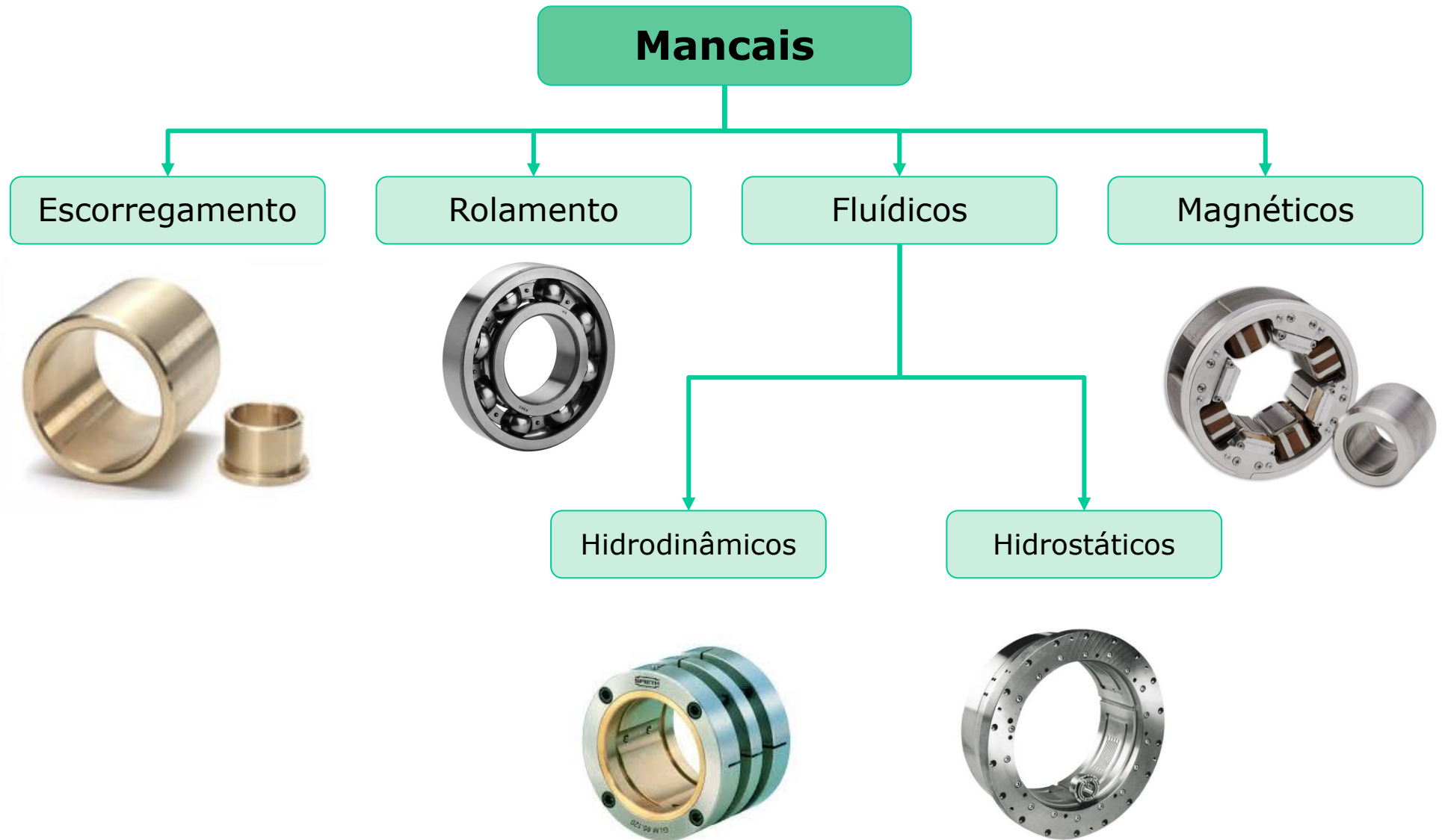




## Mancais

- **Mancais** são elementos de máquinas que tem por função básica absorver carregamentos, e onde o movimento de **translação** em qualquer direção deve ser minimizado, deixando **livre** somente a **rotação** em torno de um eixo.







## Mancais

### Generalidades

Para cada aplicação existe um tipo de mancal que melhor se adapta, sendo a escolha uma função:

- características do movimento
- tipo e intensidade dos carregamentos
- rigidez
- velocidade de trabalho
- do espaço disponível para instalação
- confiabilidade
- manutenibilidade
- custos



## Mancais de escorregamento

São empregados em aplicações de baixa velocidade de rotação, com alta capacidade de carga e rigidez.

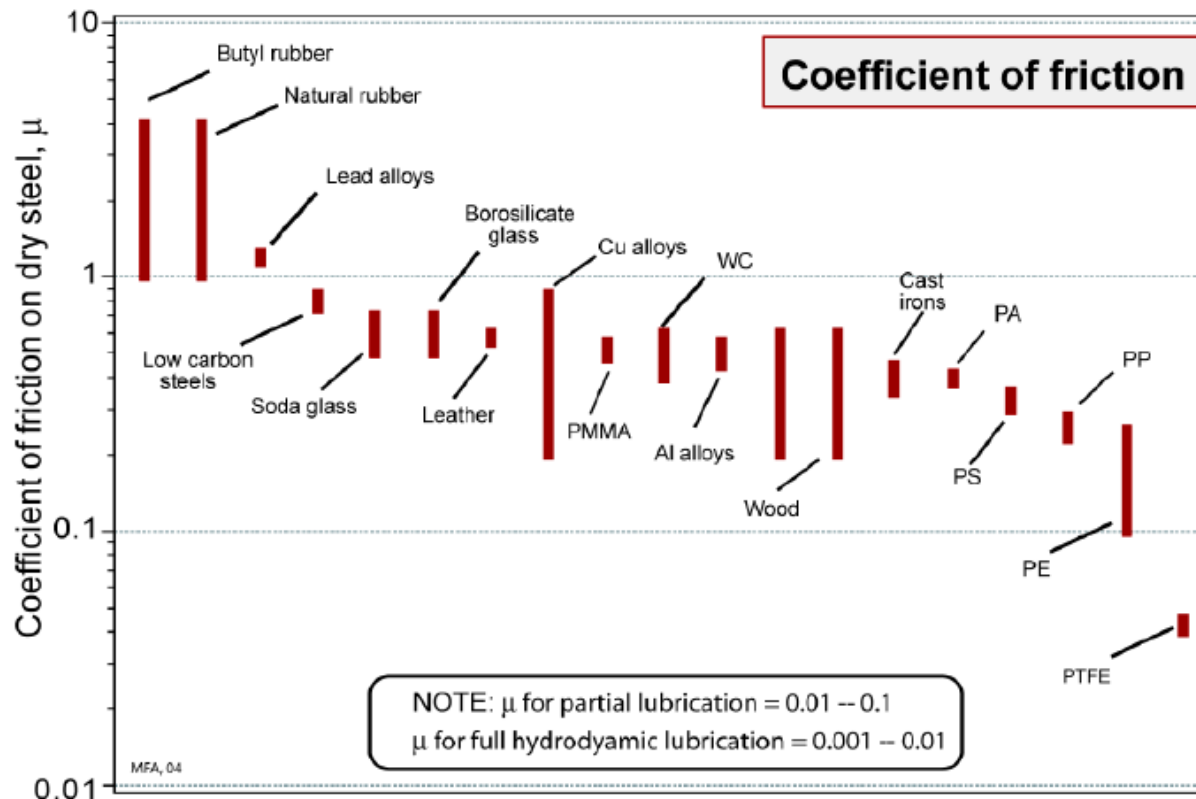
- Em geral são de custo muito baixo
- Podem apresentar desgaste excessivo
- Geram calor
- Baixa velocidade
- Vibrações
- *Stick-slip*
- Alta capacidade de carga
- Alta rigidez





## Mancais de escorregamento

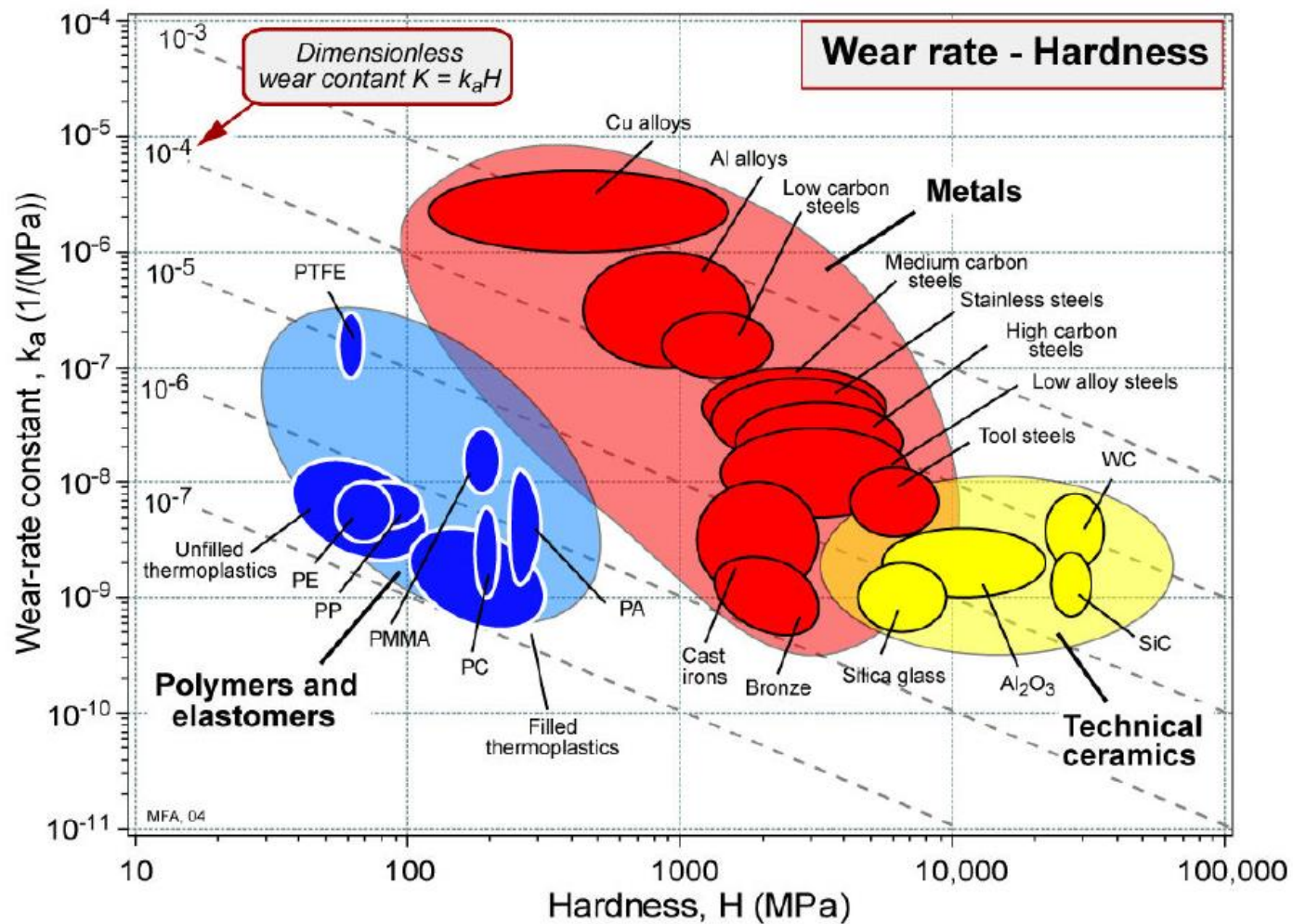
A seleção é feita em função do par tribológico, que fornece o coeficiente de atrito, da velocidade de giro, do carregamento, da taxa de desgaste esperada e do custo.





## Mancais de escorregamento

### Desgaste

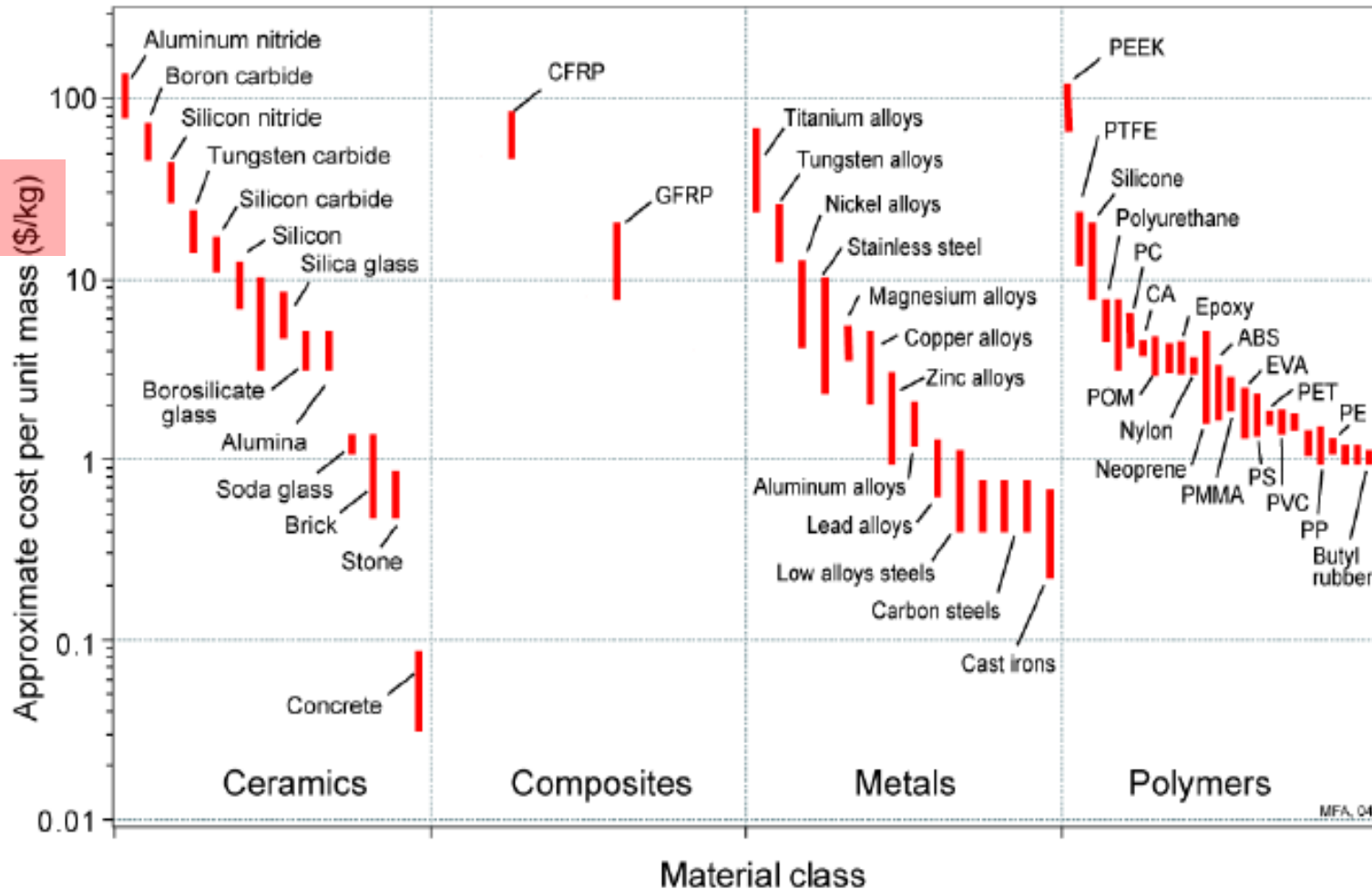






## Mancais de escorregamento

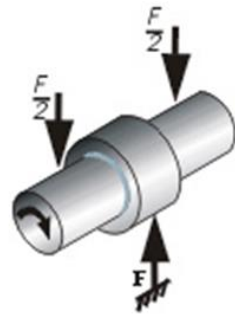
### Custo



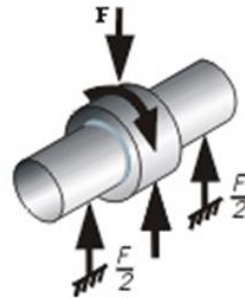


## Mancais de escorregamento

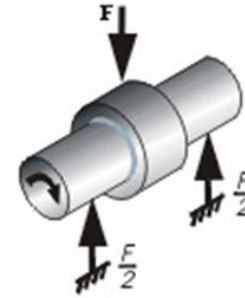
### Dimensionamento



Apoio



Mancal rotativo



Eixo rotativo

*Pressão  $P$  no mancal*

$$\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$P = \frac{F}{dl}$$

*Velocidade*

$$\left[ \frac{m}{s} \right]$$

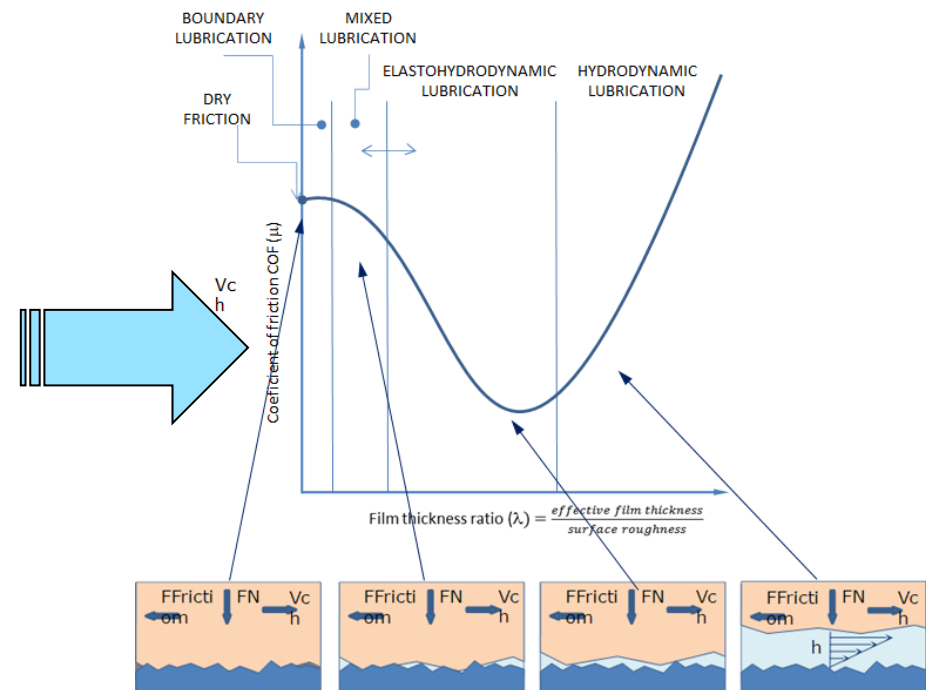
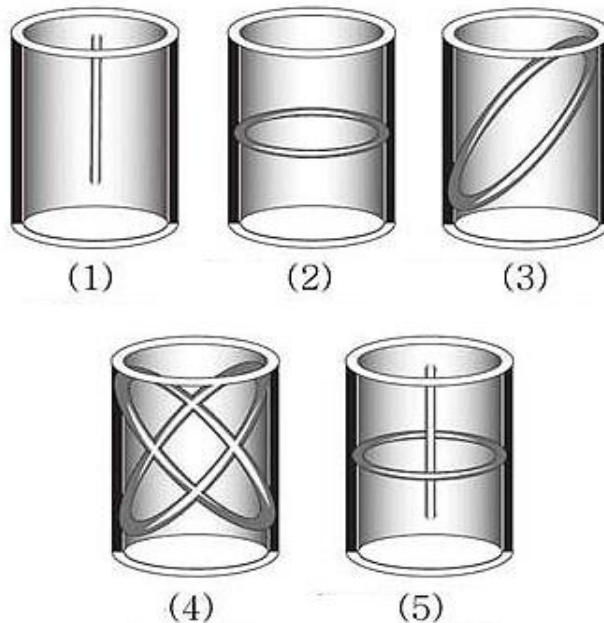
$$V = \frac{x \cdot dn}{10^3}$$



## Mancais de escorregamento

### Uso de lubrificante

O uso de lubrificante na interface permite a redução do atrito, e conseqüentemente a geração de calor, torque resistivo e desgaste.

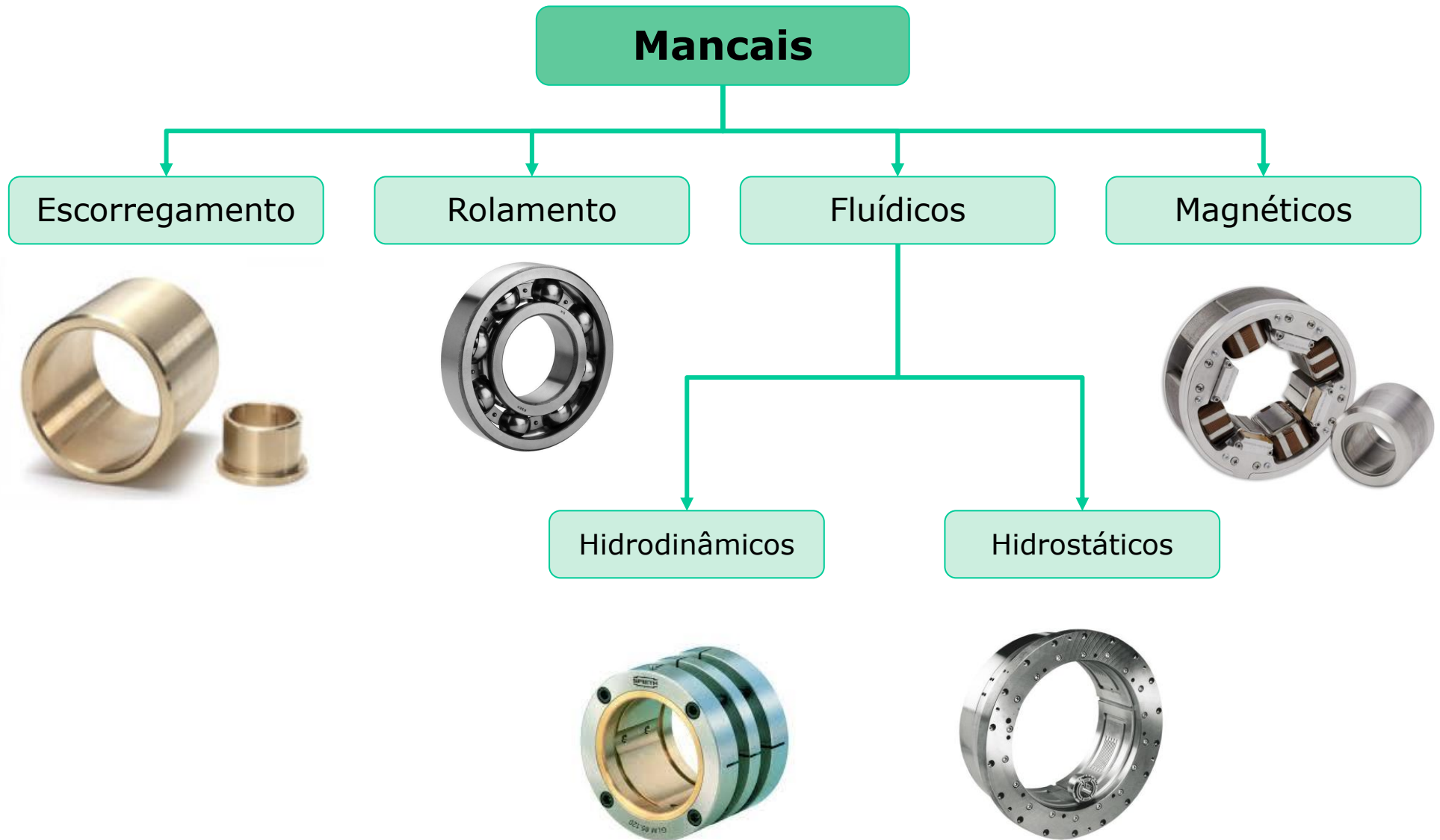




## Mancais de escorregamento

### Exemplos







## Mancais de rolamento

### Exemplos





## Mancais de rolamento

### Introdução

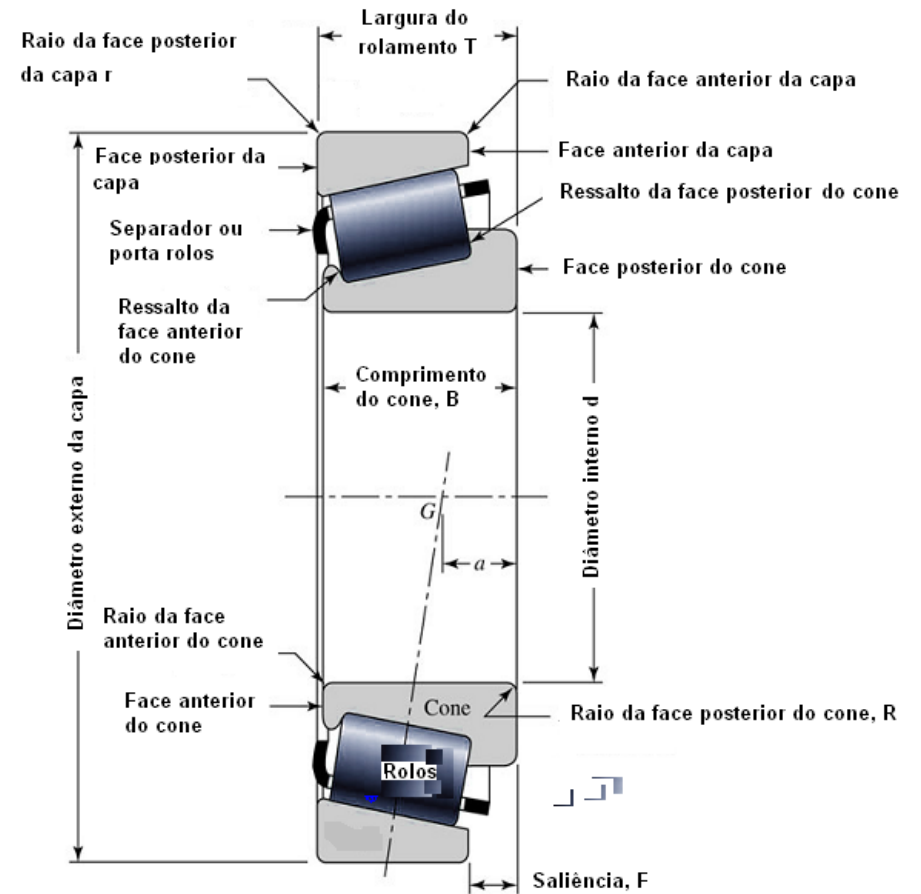
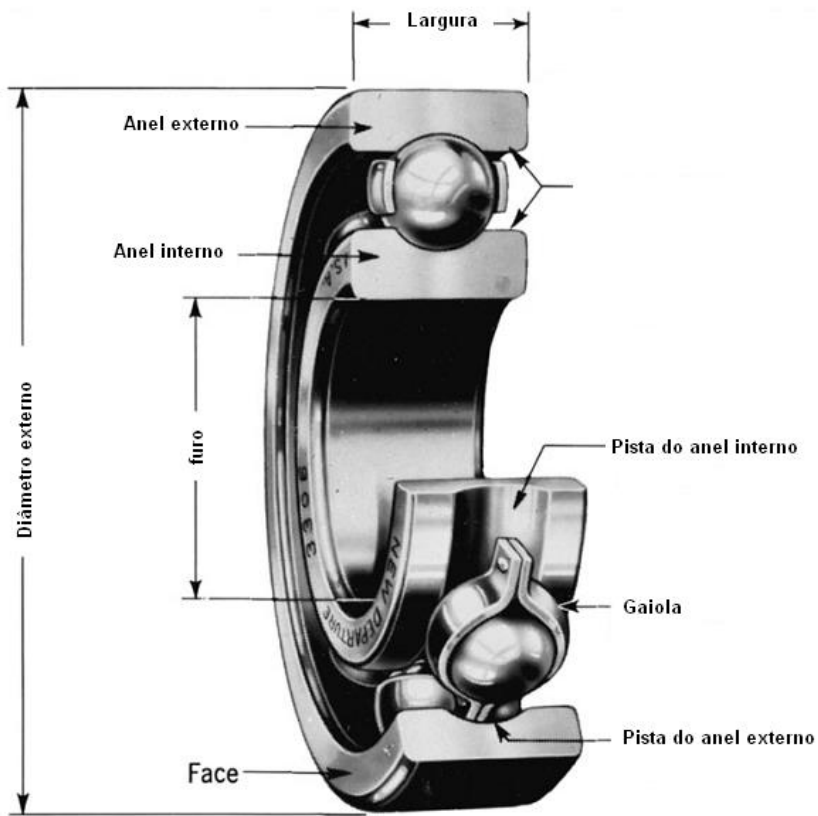
São os tipos de mancais mais utilizados, e são caracterizados por:

- fácil movimentação
- mínimo atrito
- elevado nível de padronização



## Mancais de rolamento

### Nomenclatura

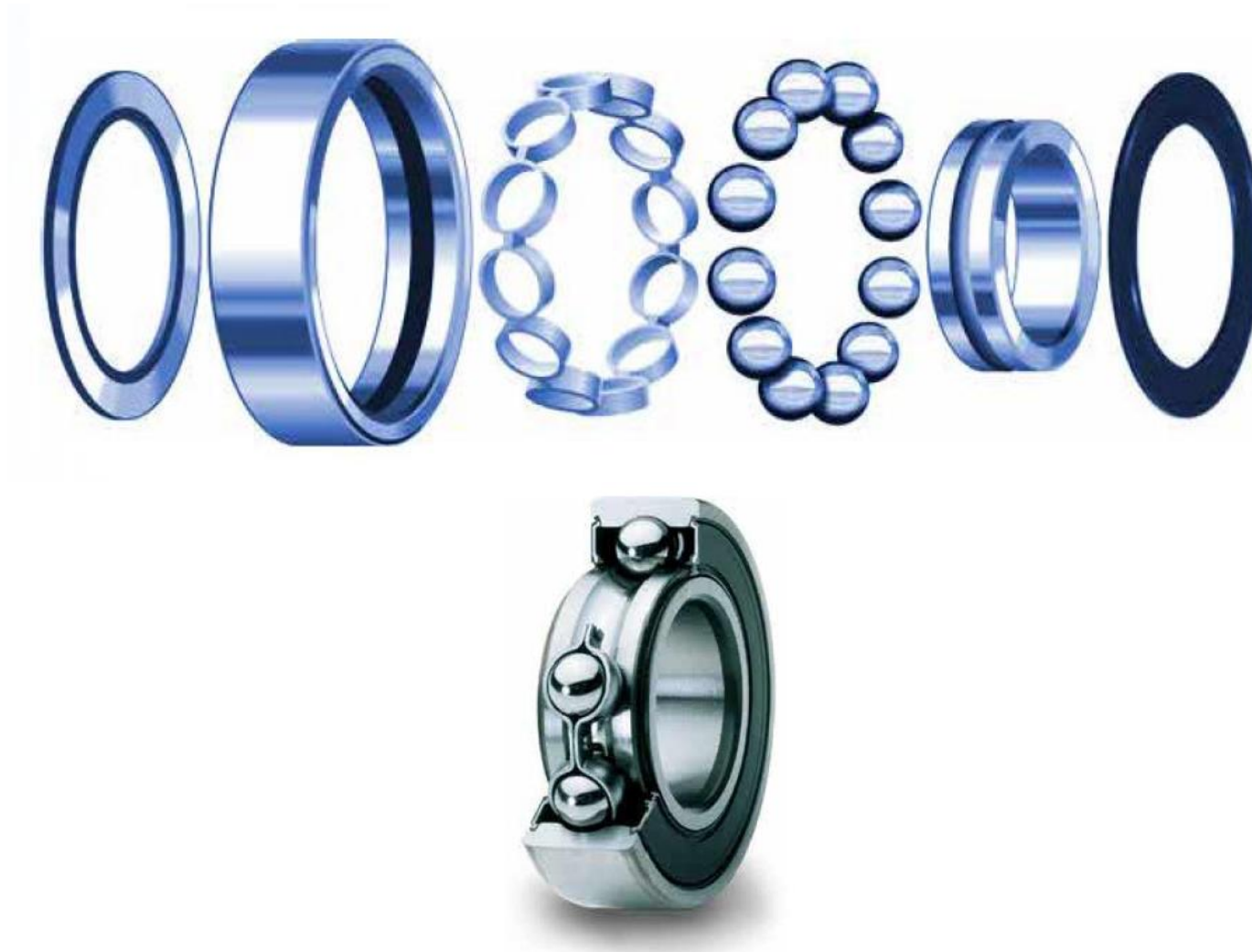






## Mancais de rolamento

Constituintes

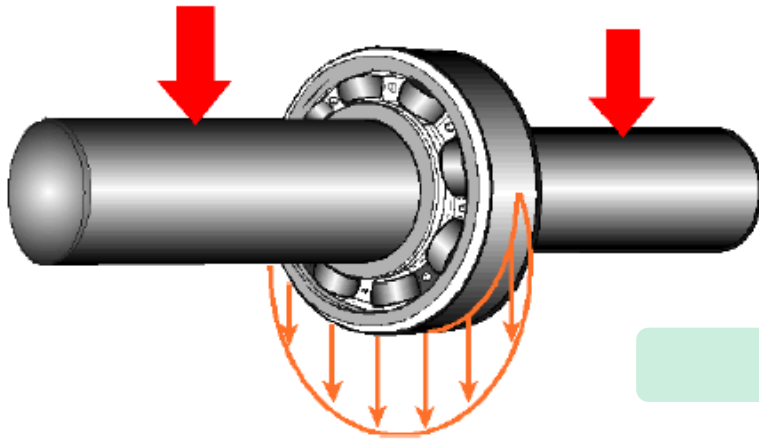




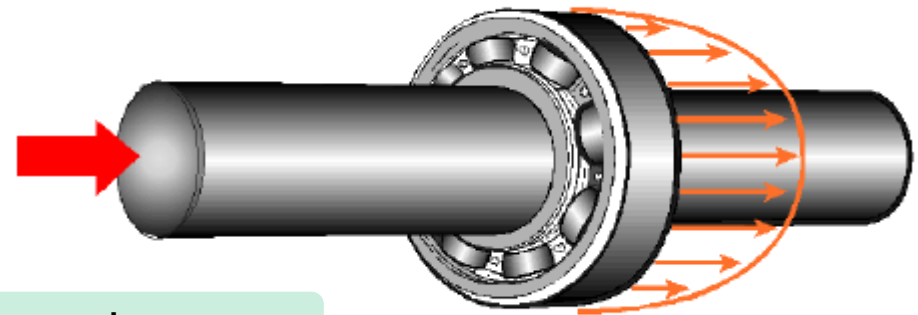
## Mancais de rolamento

### Carregamentos

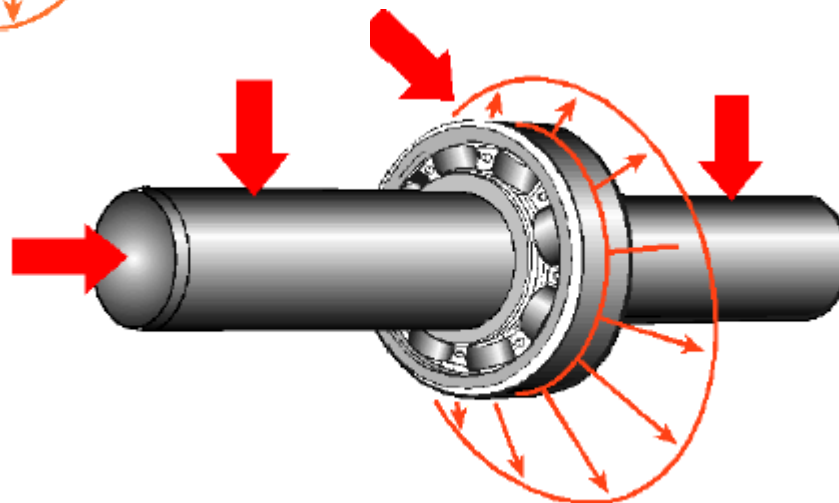
#### Radiais



#### Axiais



#### Compostos





## Mancais de rolamento

Classificação quanto ao carregamento



Radiais



Radiais/Axiais

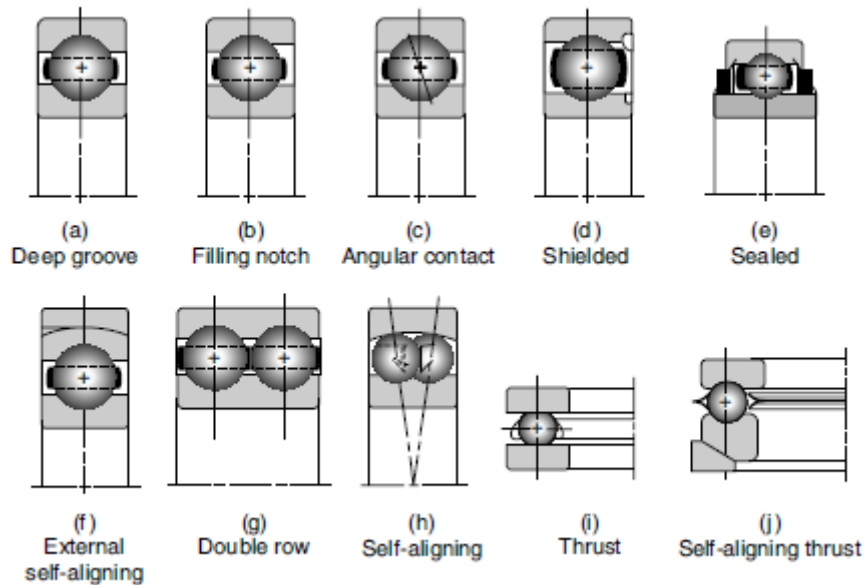
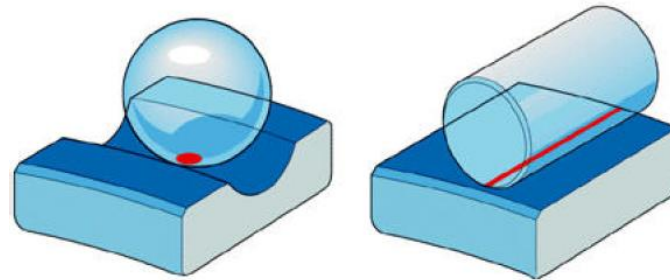


Axiais

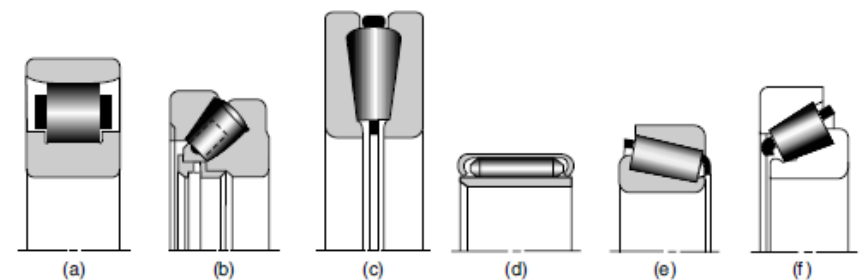


# Mancais de rolamento

Classificação quanto a forma do elemento rolante



Mancais de esfera



Mancais de rolos

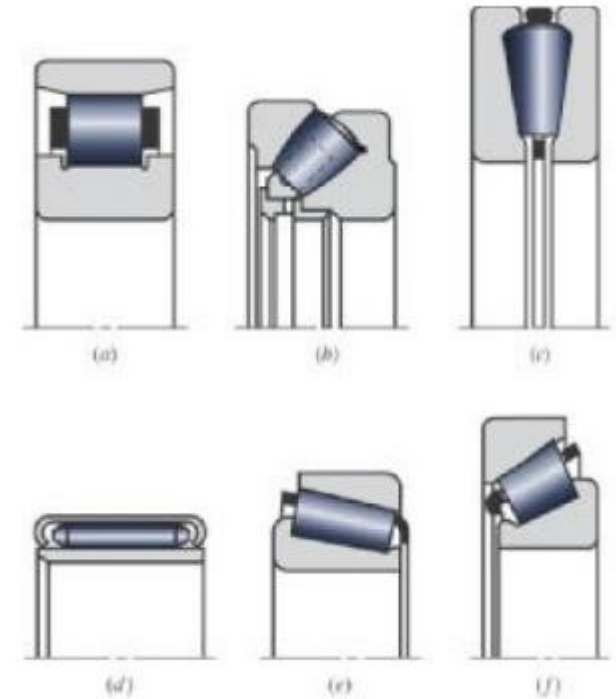
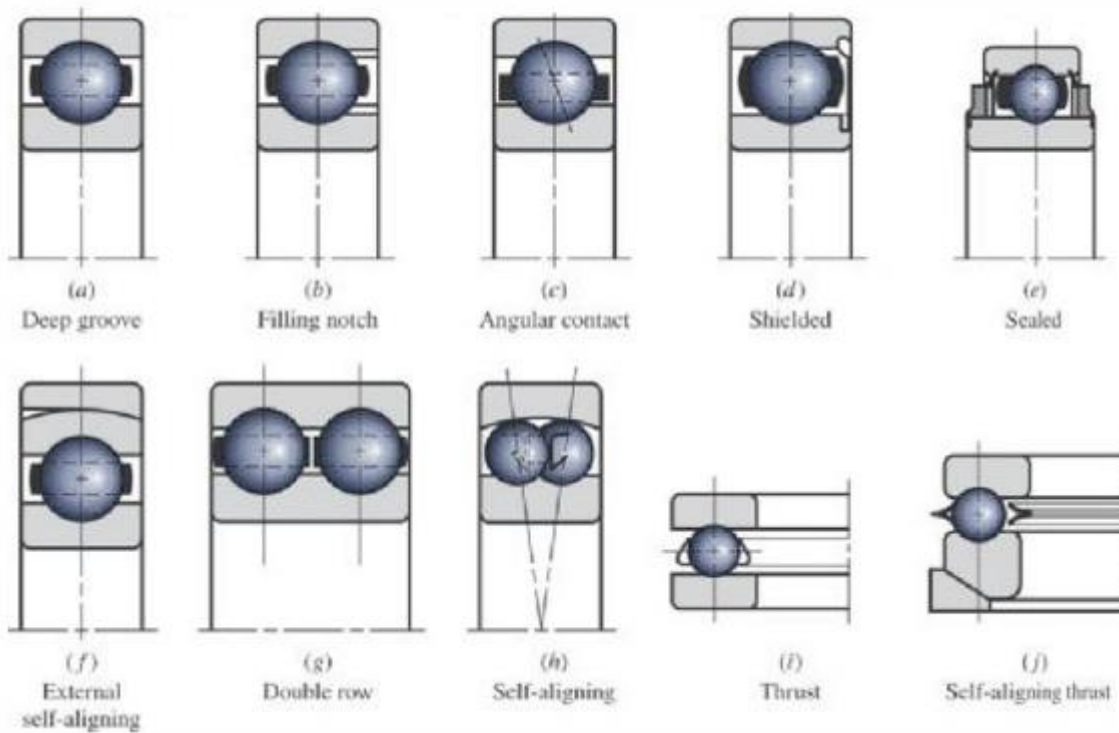


## Mancais de rolamento

### Tipos de mancais de esferas

de esferas

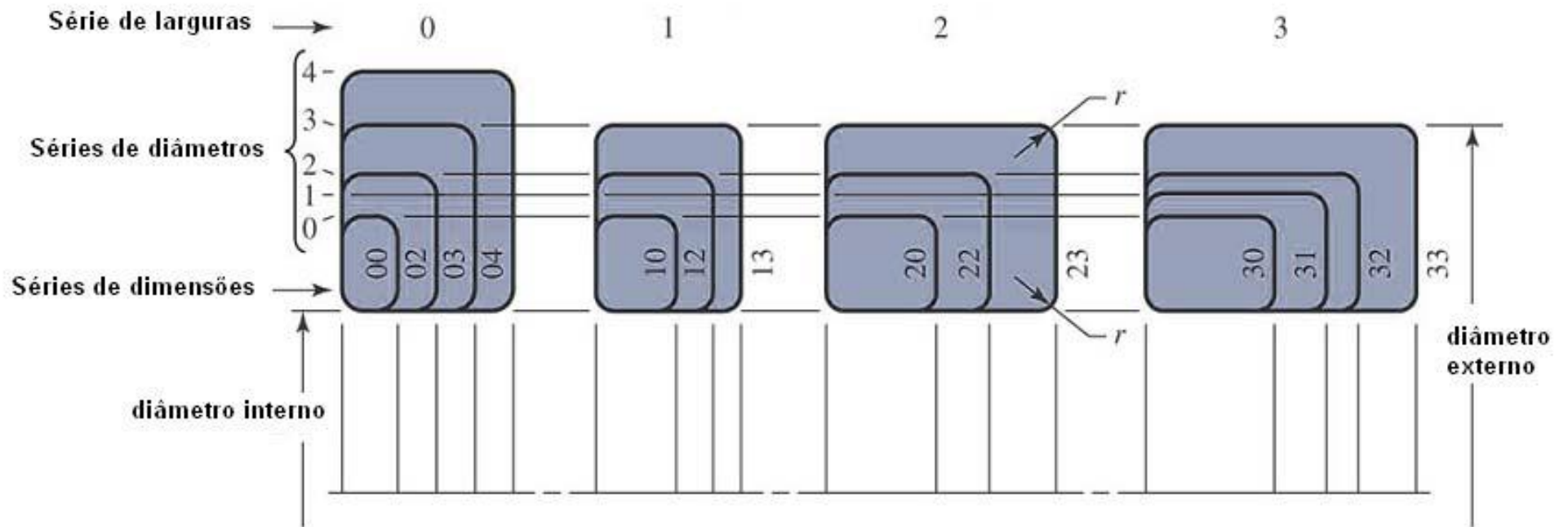
de rolos





## Mancais de rolamento

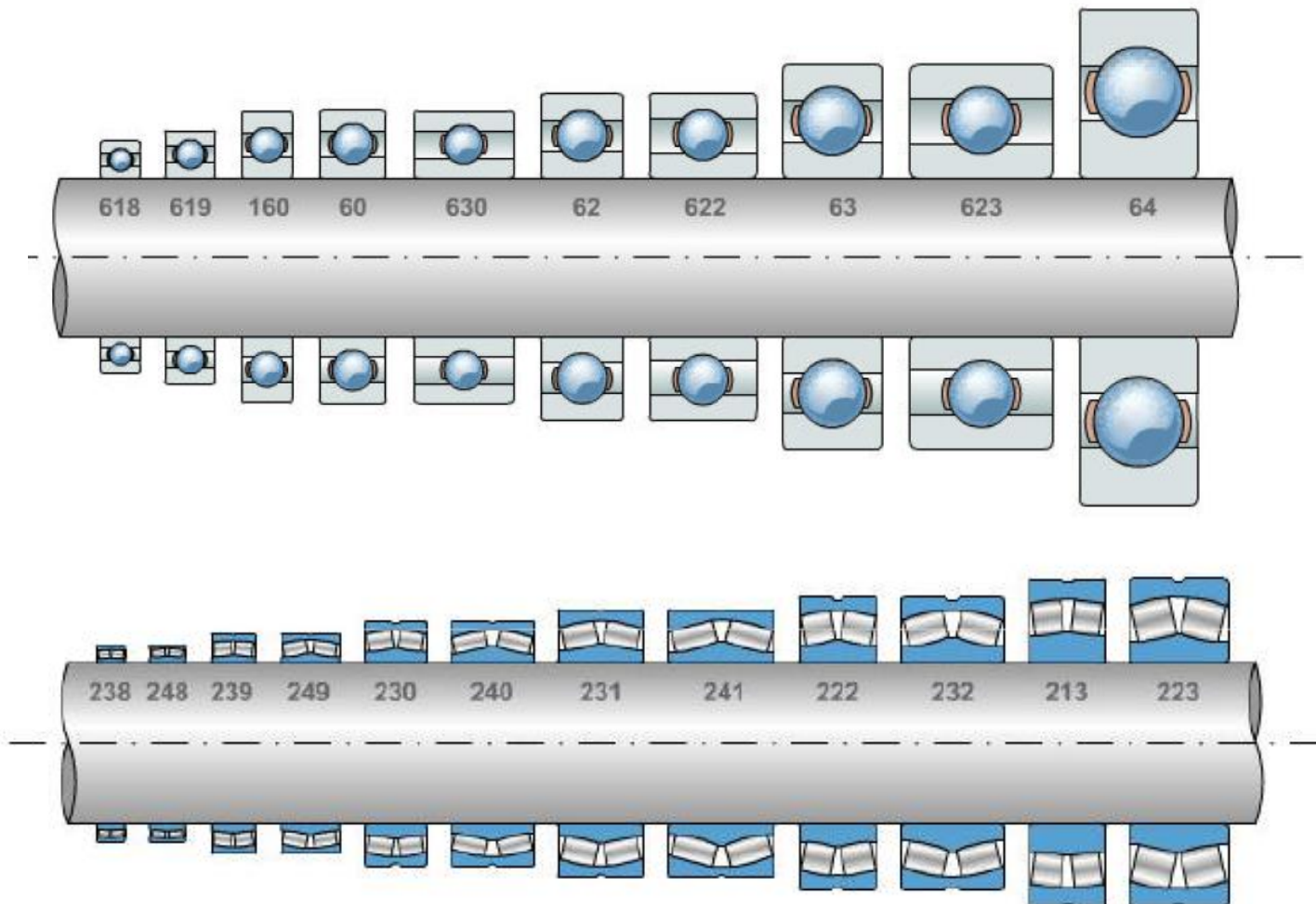
### Classes de dimensões





## Mancais de rolamento

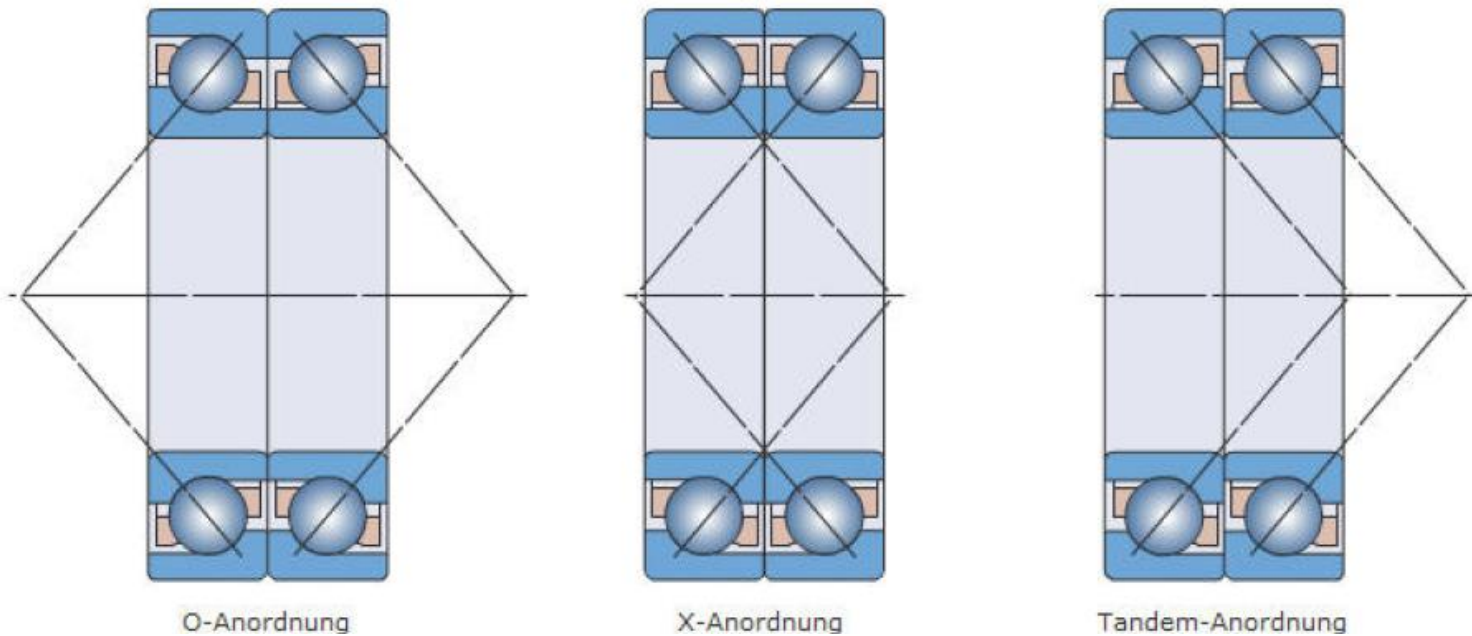
### Classes de dimensões





## Mancais de rolamento

### Montagem

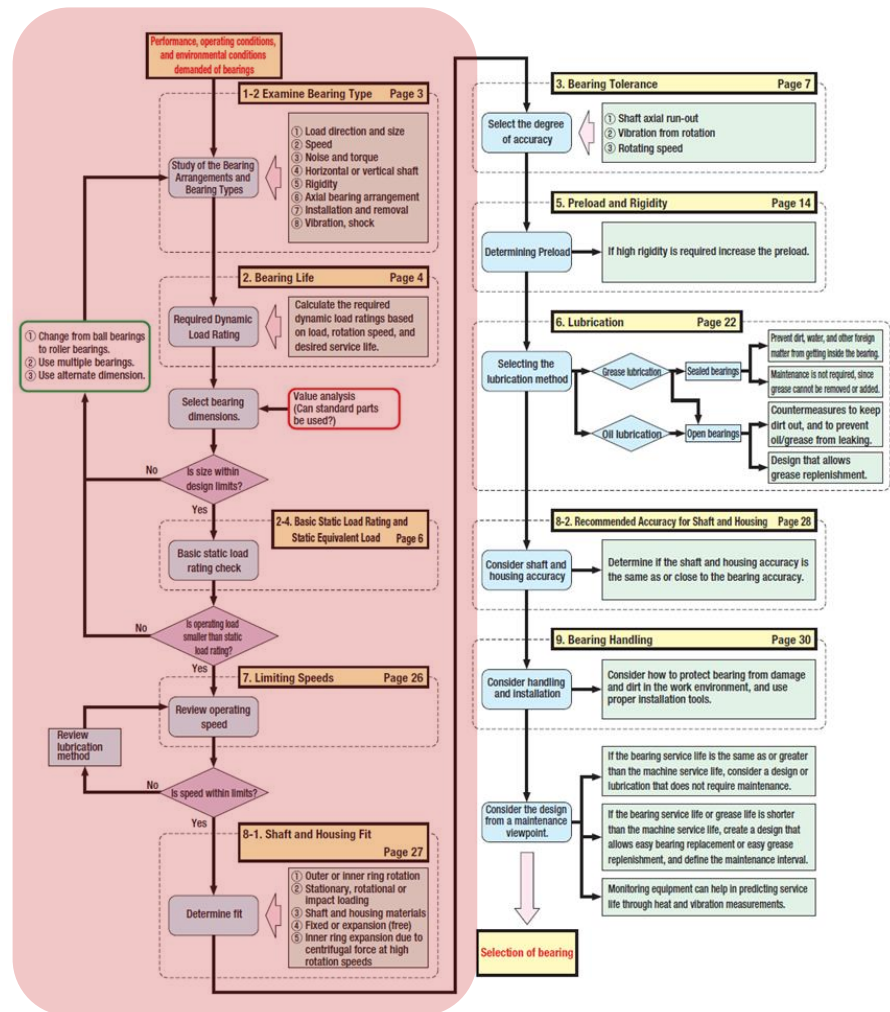






## Mancais de rolamento

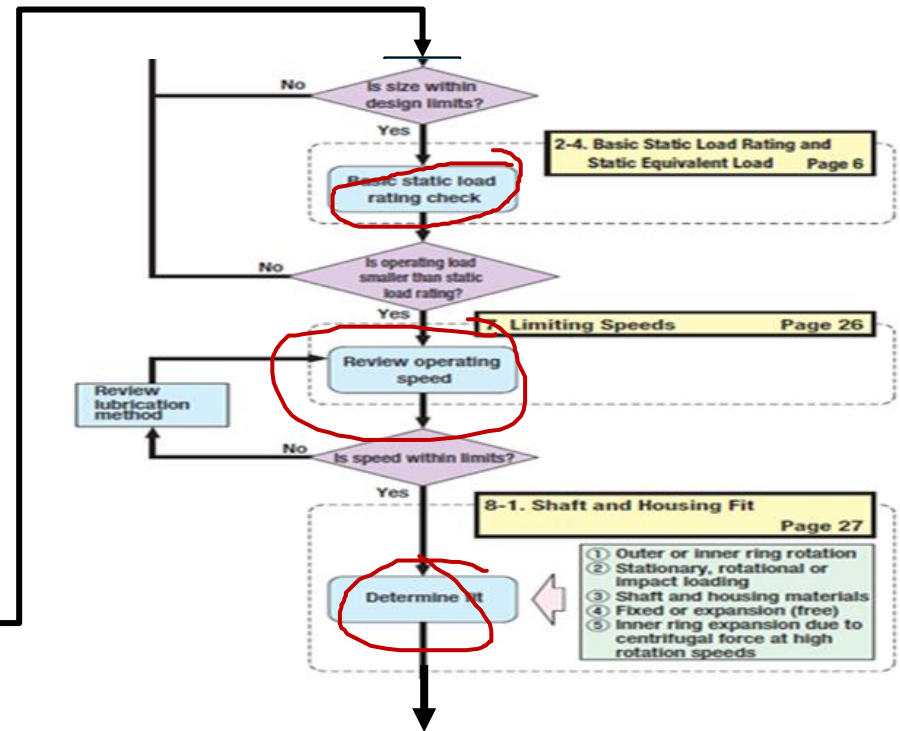
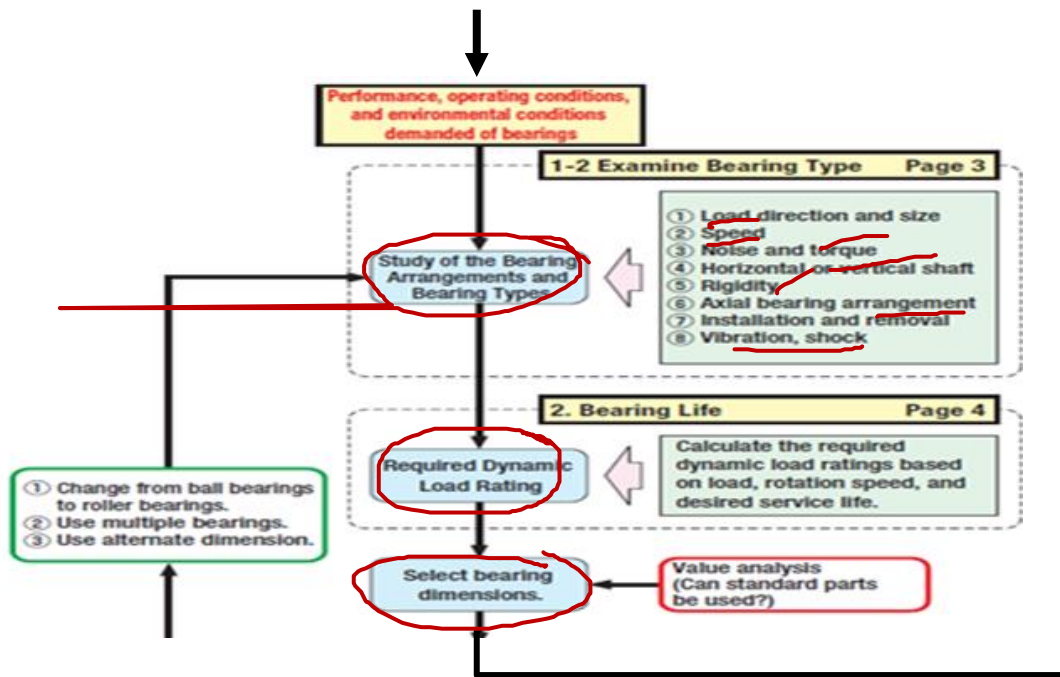
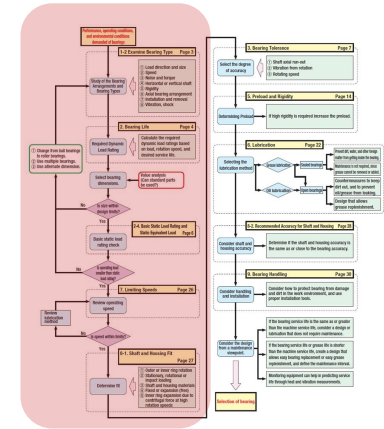
### Seleção





## Mancais de rolamento

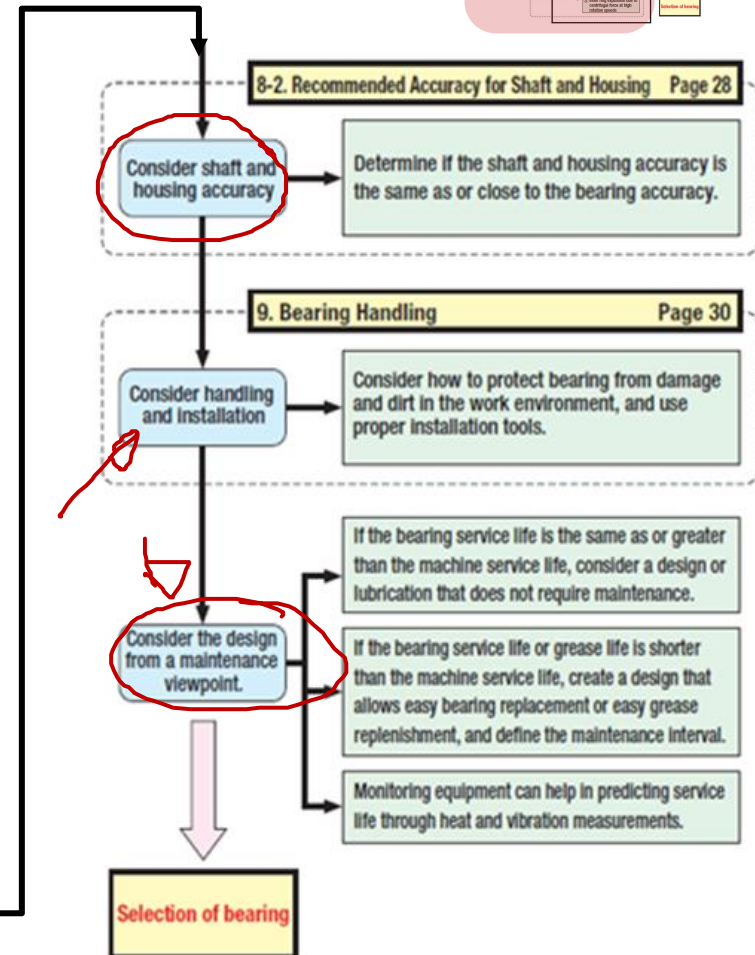
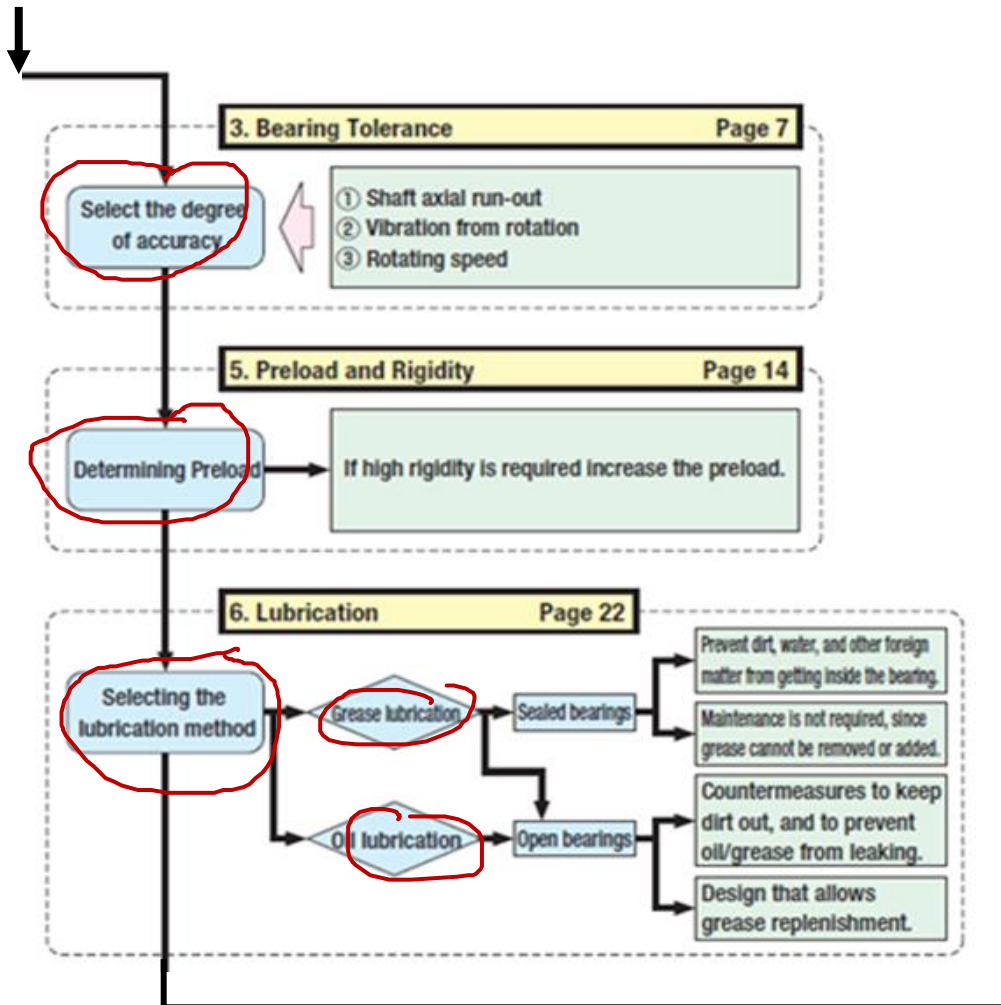
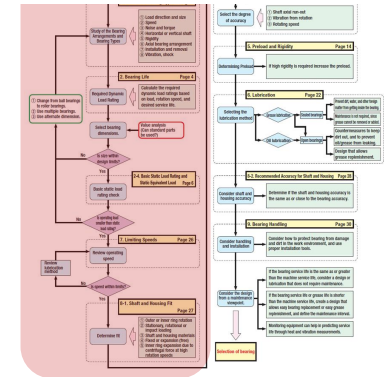
## Seleção





## Mancais de rolamento

### Seleção





## Mancais de rolamento

### Precisão

#### Tolerâncias geométricas e dimensionais

- › Tolerances for bore and outside diameters, ring and bearing width
- › Tolerances for inscribed and circumscribed circle diameters of rollers
- › Tolerances for chamfer dimensions
- › Tolerances for width variation
- › Tolerances for tapered bore diameters

#### Precisão de giro (radial e axial)

- › Permissible radial run-out of inner and outer rings
- › Permissible face run-out with raceway inner and outer rings
- › Permissible inner ring face run-out with bore
- › Permissible outer ring variation of outside surface generatrix inclination with face
- › Permissible raceway-to-back-face thickness variation of thrust bearings



**Mancais de rolamento**

**Classes de tolerâncias**

<b>ABEC SYSTEM</b>	<b>ISO SYSTEM</b>	<b>DIN SYSTEM</b>
ABEC 1	Normal	P0
ABEC 3	Class 6	P6
ABEC 5	Class 5	P5
ABEC 7	Class 4	P4
ABEC 9	Class 2	P2

System bearing type			Precision bearing class			
Metric	Timken	Tapered roller bearings	C	B	A	AA
		Crossed roller bearings	S	P	-	-
	ISO/DIN	All bearing types	P5	P4	P2	-
ABMA		Non-tapered roller bearings	RBEC 5	RBEC 7	RBEC 9	-
		Ball bearings	ABEC 5	ABEC 7	ABEC 9	-
		Tapered roller bearings	C	B	A	-



## Mancais de rolamento

### Classes de tolerâncias

Referenced from ANSI/ABMA Std. 20

Inner Ring:  $0.6\text{mm} < d \leq 2.5\text{mm}$

Unit:  $\mu\text{m}$

Grade	Dimensional Difference				Radial Runout $K_{ra}$	Perpendicularity $S_p$	Axial Runout $S_{ra}$	Dimensional Difference of Width		Variation of Width $V_{sa}$
	$\Delta d_{ep}$		$\Delta d_s$					$\Delta B_s$		
	High	Low	High	Low				High	Low	
1	0	-8	-	-	10	-	15	0	-40	12
3	0	-7	-	-	5	-	10	0	-40	12
5	0	-5	-	-	4	7	7	0	-40	5
7	0	-4	0	-4	2.5	3	3	0	-40	2.5
9	0	-2.5	0	-2.5	1.5	1.5	1.5	0	-40	1.5

Inner Ring:  $2.5\text{mm} < d \leq 10\text{mm}$

Unit:  $\mu\text{m}$

Grade	Dimensional Difference				Radial Runout $K_{ra}$	Perpendicularity $S_p$	Axial Runout $S_{ra}$	Dimensional Difference of Width		Variation of Width $V_{sa}$
	$\Delta d_{ep}$		$\Delta d_s$					$\Delta B_s$		
	High	Low	High	Low				High	Low	
1	0	-8	-	-	10	-	20	0	-120	15
3	0	-7	-	-	6	-	15	0	-120	15
5	0	-5	-	-	4	7	7	0	-40	5
7	0	-4	0	-4	2.5	3	3	0	-40	2.5
9	0	-2.5	0	-2.5	1.5	1.5	1.5	0	-40	1.5

Inner Ring:  $10\text{mm} < d \leq 18\text{mm}$

Unit:  $\mu\text{m}$

Grade	Dimensional Difference				Radial Runout $K_{ra}$	Perpendicularity $S_p$	Axial Runout $S_{ra}$	Dimensional Difference of Width		Variation of Width $V_{sa}$
	$\Delta d_{ep}$		$\Delta d_s$					$\Delta B_s$		
	High	Low	High	Low				High	Low	
1	0	-8	-	-	10	-	20	0	-120	20
3	0	-7	-	-	7	-	20	0	-120	20
5	0	-5	-	-	4	7	7	0	-80	5
7	0	-4	0	-4	2.5	3	3	0	-80	2.5
9	0	-2.5	0	-2.5	1.5	1.5	1.5	0	-80	1.5

Referenced from ANSI/ABMA Std. 20.0

Outer Ring:  $2.5\text{mm} < D \leq 6\text{mm}$

Unit:  $\mu\text{m}$

Grade	Dimensional Difference				Radial Runout $K_{ra}$	Perpendicularity $S_p$	Axial Runout $S_{ra}$	Dimensional Difference of Width		Variation of Width $V_{sa}$
	$\Delta D_{ep}$		$\Delta D_s$					$\Delta C_s$		
	High	Low	High	Low				High	Low	
1	0	-8	-	-	15	-	15	0	-40	12
3	0	-7	-	-	8	-	10	0	-40	12
5	0	-5	-	-	5	8	8	0	-40	5
7	0	-4	0	-4	3	4	5	0	-40	2.5
9	0	-2.5	0	-2.5	1.5	1.5	1.5	0	-40	1.5

Outer Ring:  $6\text{mm} < D \leq 18\text{mm}$

Unit:  $\mu\text{m}$

Grade	Dimensional Difference				Radial Runout $K_{ra}$	Perpendicularity $S_p$	Axial Runout $S_{ra}$	Dimensional Difference of Width		Variation of Width $V_{sa}$
	$\Delta D_{ep}$		$\Delta D_s$					$\Delta C_s$		
	High	Low	High	Low				High	Low	
1	0	-8	-	-	15	-	20	0	-120	15
3	0	-7	-	-	8	-	15	0	-120	15
5	0	-5	-	-	5	8	8	0	-40	5
7	0	-4	0	-4	3	4	5	0	-40	2.5
9	0	-2.5	0	-2.5	1.5	1.5	1.5	0	-40	1.5

Outer Ring:  $18\text{mm} < D \leq 30\text{mm}$

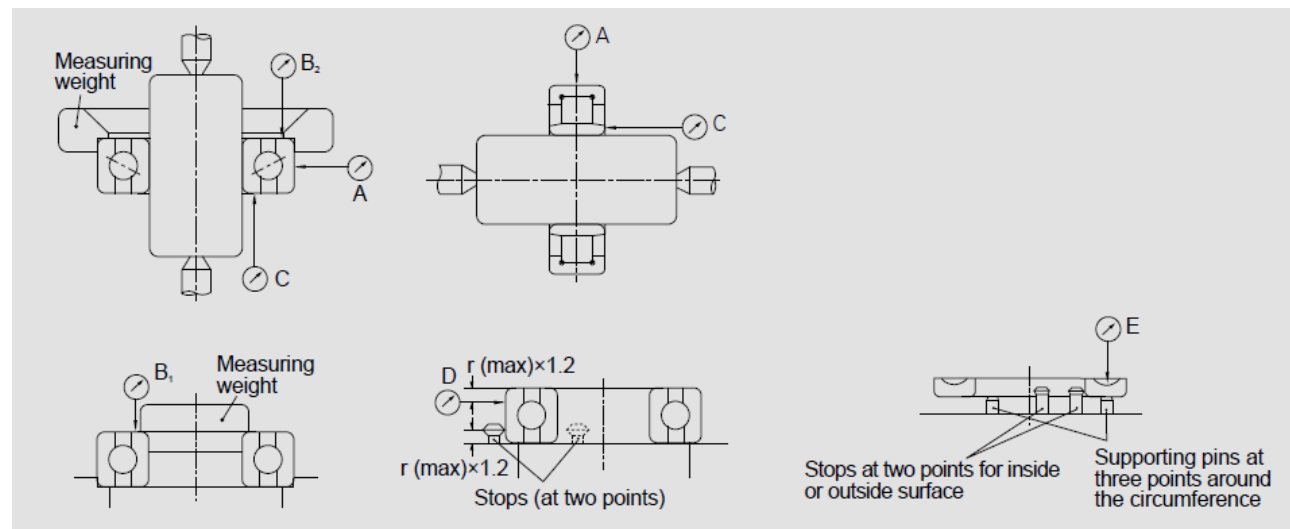
Unit:  $\mu\text{m}$

Grade	Dimensional Difference				Radial Runout $K_{ra}$	Perpendicularity $S_p$	Axial Runout $S_{ra}$	Dimensional Difference of Width		Variation of Width $V_{sa}$
	$\Delta D_{ep}$		$\Delta D_s$					$\Delta C_s$		
	High	Low	High	Low				High	Low	
1	0	-9	-	-	15	-	25	0	-120	20
3	0	-8	-	-	9	-	15	0	-120	20
5	0	-6	-	-	6	8	8	0	-80	5
7	0	-5	0	-5	4	4	5	0	-80	2.5
9	0	-4	0	-4	2.5	1.5	2.5	0	-80	1.5

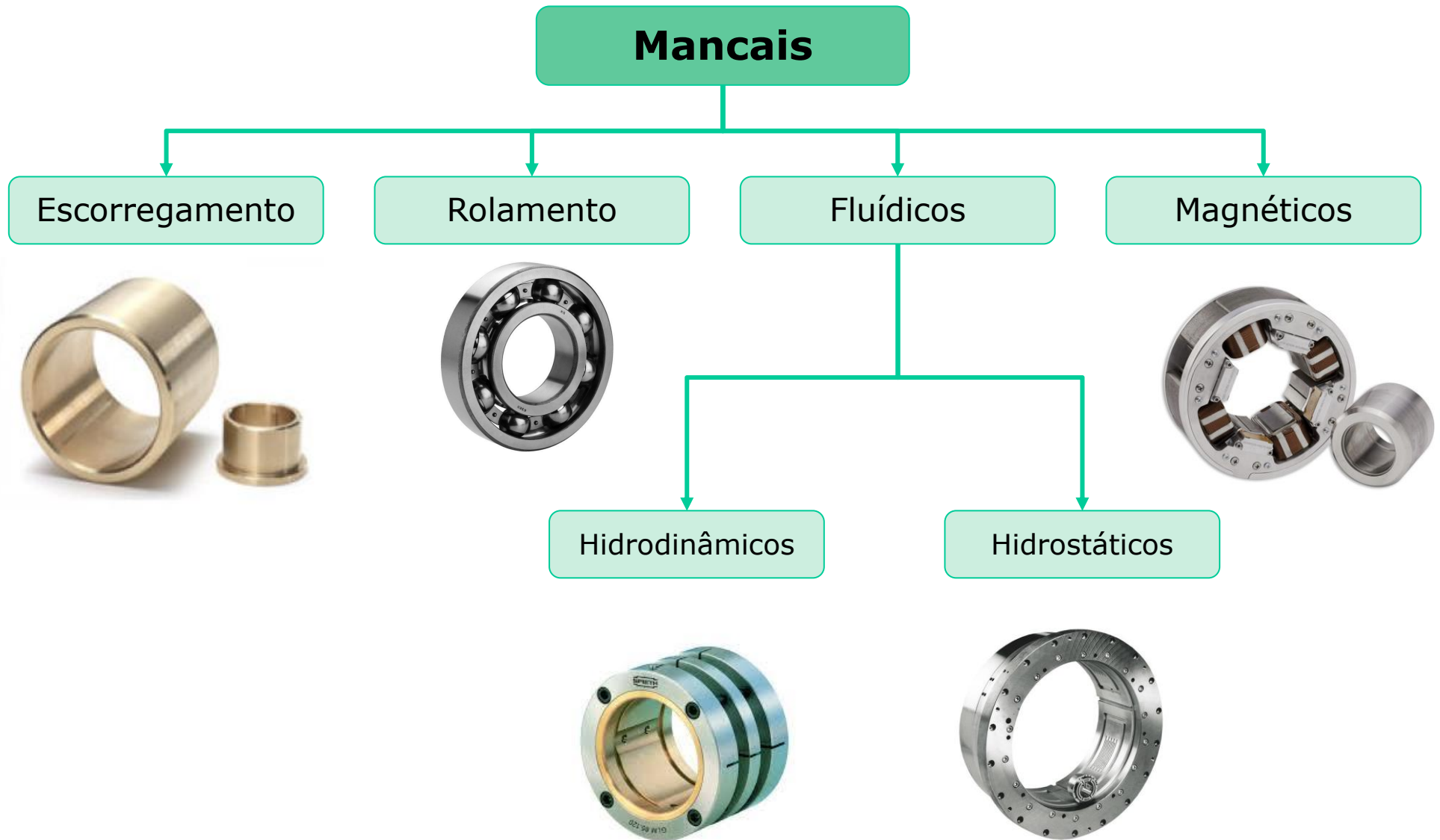


## Mancais de rolamento

### Erros de movimento



Running accuracy	Inner ring	Outer ring	Measuring point
$K_{ia}$	rotating	stationary	A
$K_{ea}$	stationary	rotating	A
$S_{ia}$	rotating	stationary	B <sub>1</sub>
$S_{ea}$	stationary	rotating	B <sub>2</sub>
$S_d$	rotating	stationary	C
$S_D$	–	rotating	D
$S_i, S_e$	Only the shaft or housing or central washer is to be rotated		E







**Mancais a filme fluído**





## Mancais a filme fluído

### Classificação

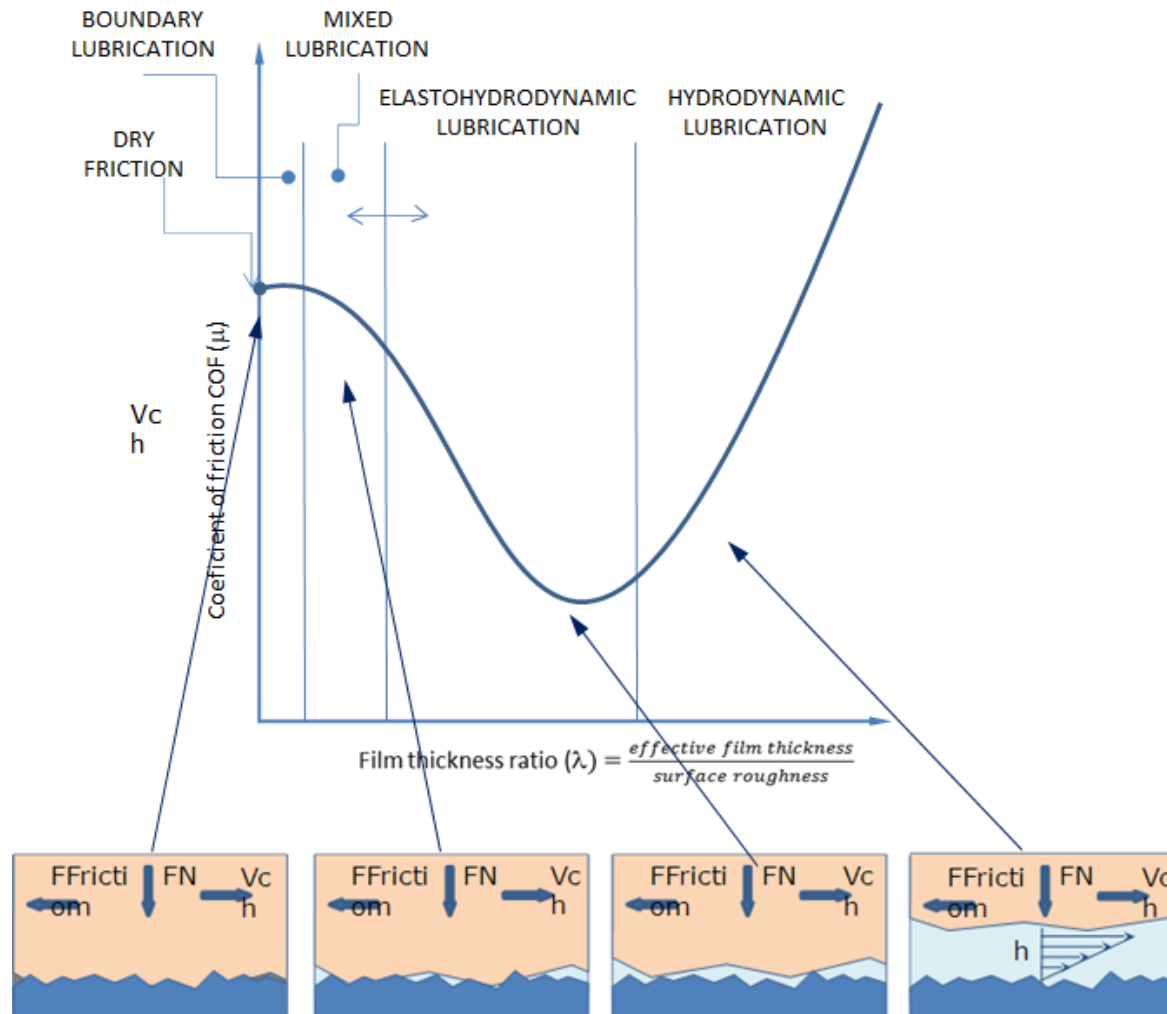
Quanto a forma de sustentação

- mancais fluidodinâmicos, que são aqueles cuja pressão da filme de lubrificante que suportará a carga é dependente da velocidade tangencial do mancal
- mancais fluidoestáticos, que são aqueles em que as superfícies com movimento relativo são separadas por um filme lubrificante, forçado sob pressão, a qual é fornecida por uma fonte externa (bomba ou compressor)



## Mancais hidrodinâmicos

### Curva de Stribeck

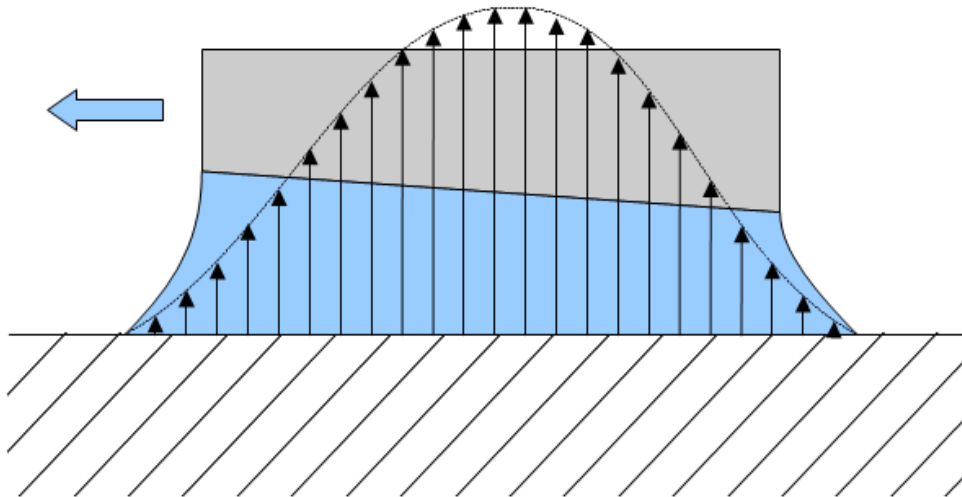




## Mancais a filme fluido

### Introdução

São mancais onde as superfícies com movimento relativo são separadas por um filme fluido, o qual pode ser líquido ou gasoso



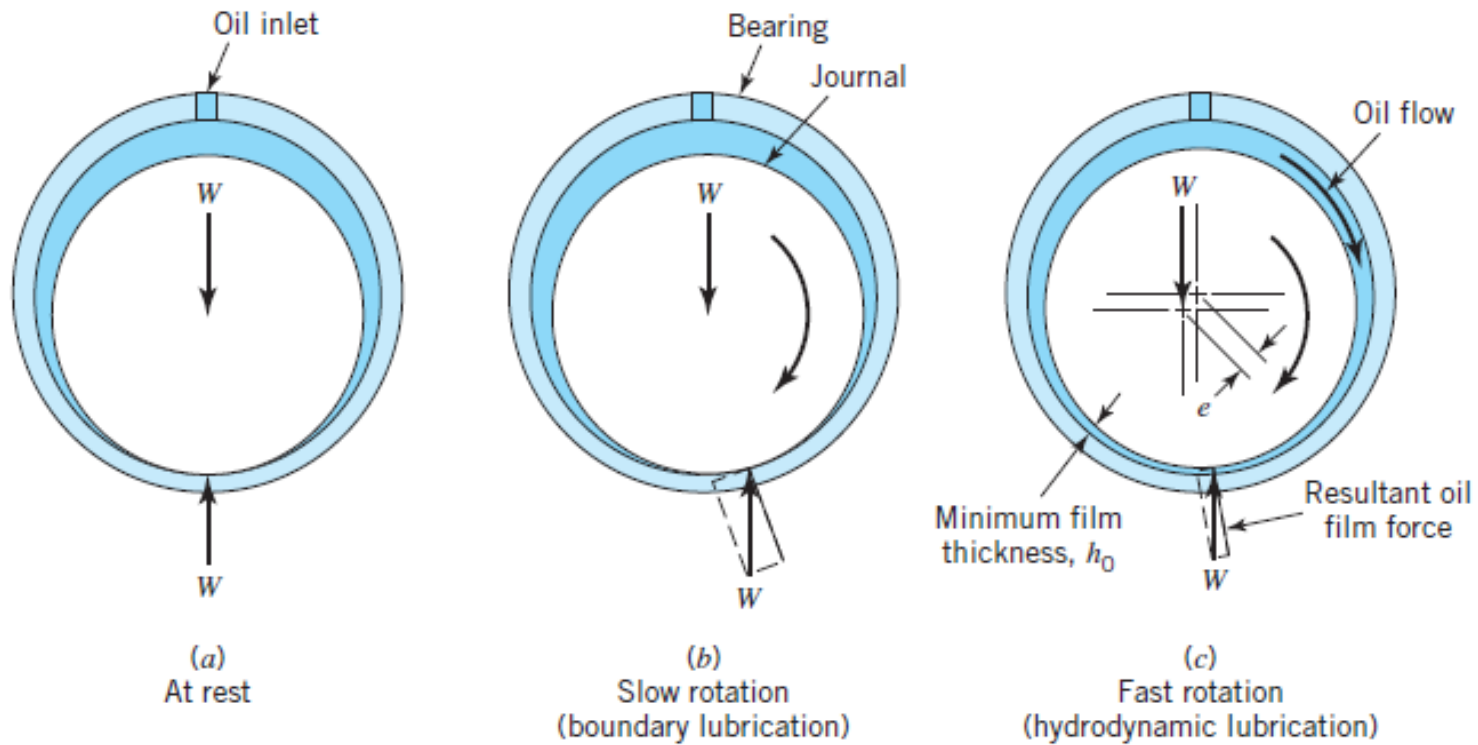
→ Líquidos: óleo, água, outros

→ Gás: AR, hélio, Ar, outros



## Mancais hidrodinâmicos

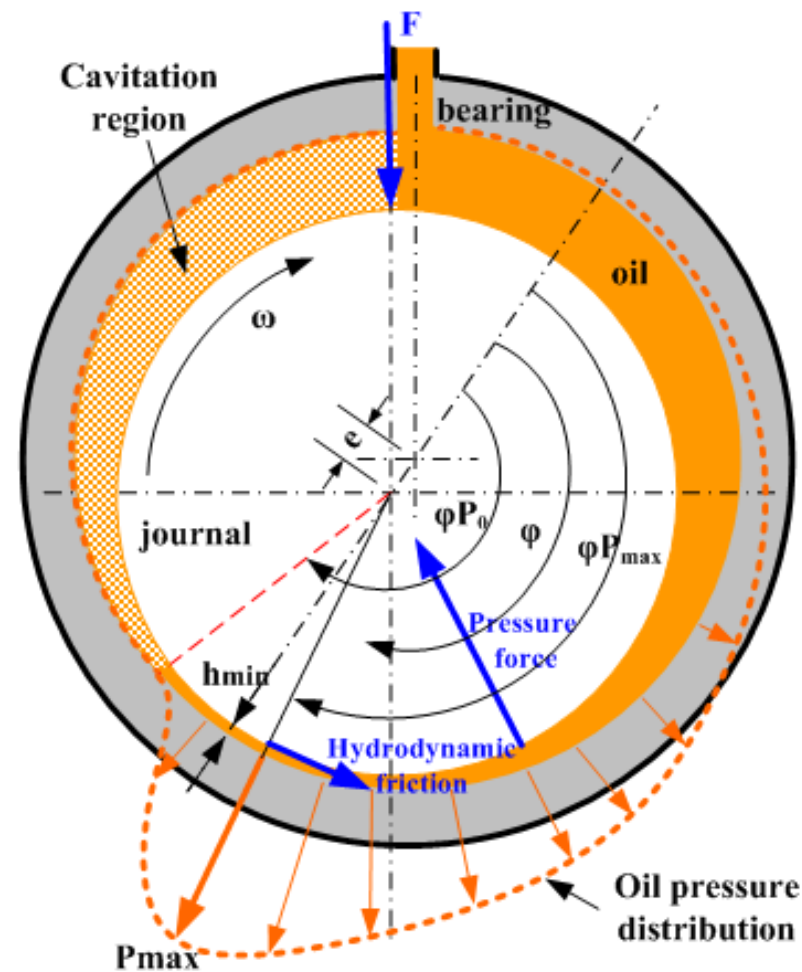
### Funcionamento





## Mancais hidrodinâmicos

### Funcionamento





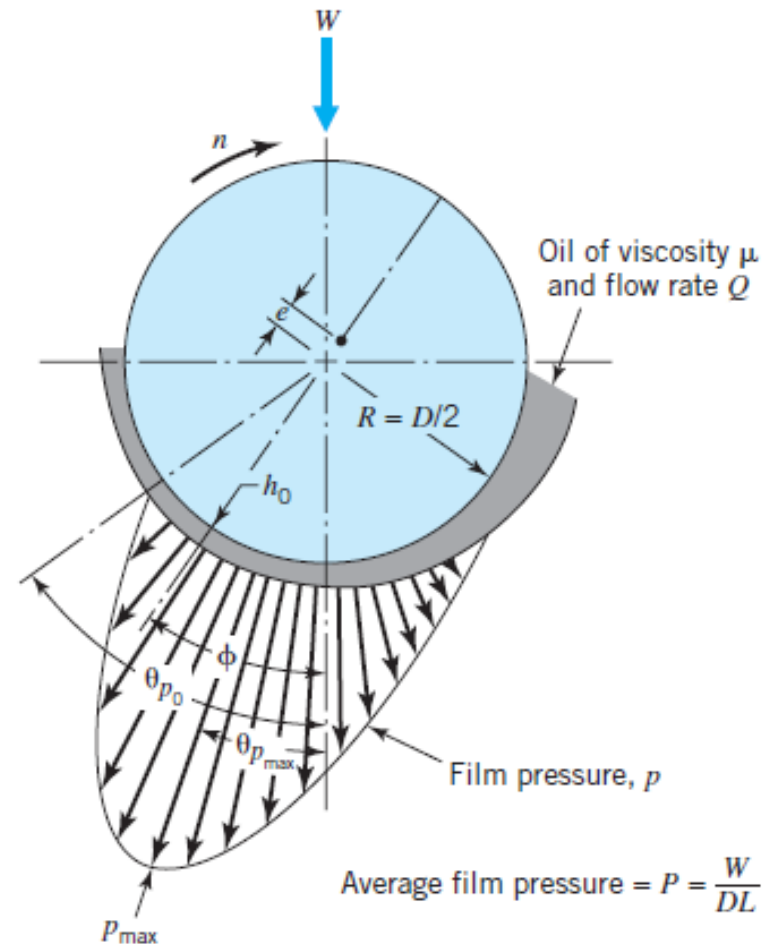
## Mancais hidrodinâmicos

### Número característico

$$S = \left(\frac{R}{c}\right) \frac{\mu n}{P}$$

Onde:

- R – raio do mancal
- c – excentricidade
- $\mu$  – viscosidade
- n – rotação
- P – Pressão

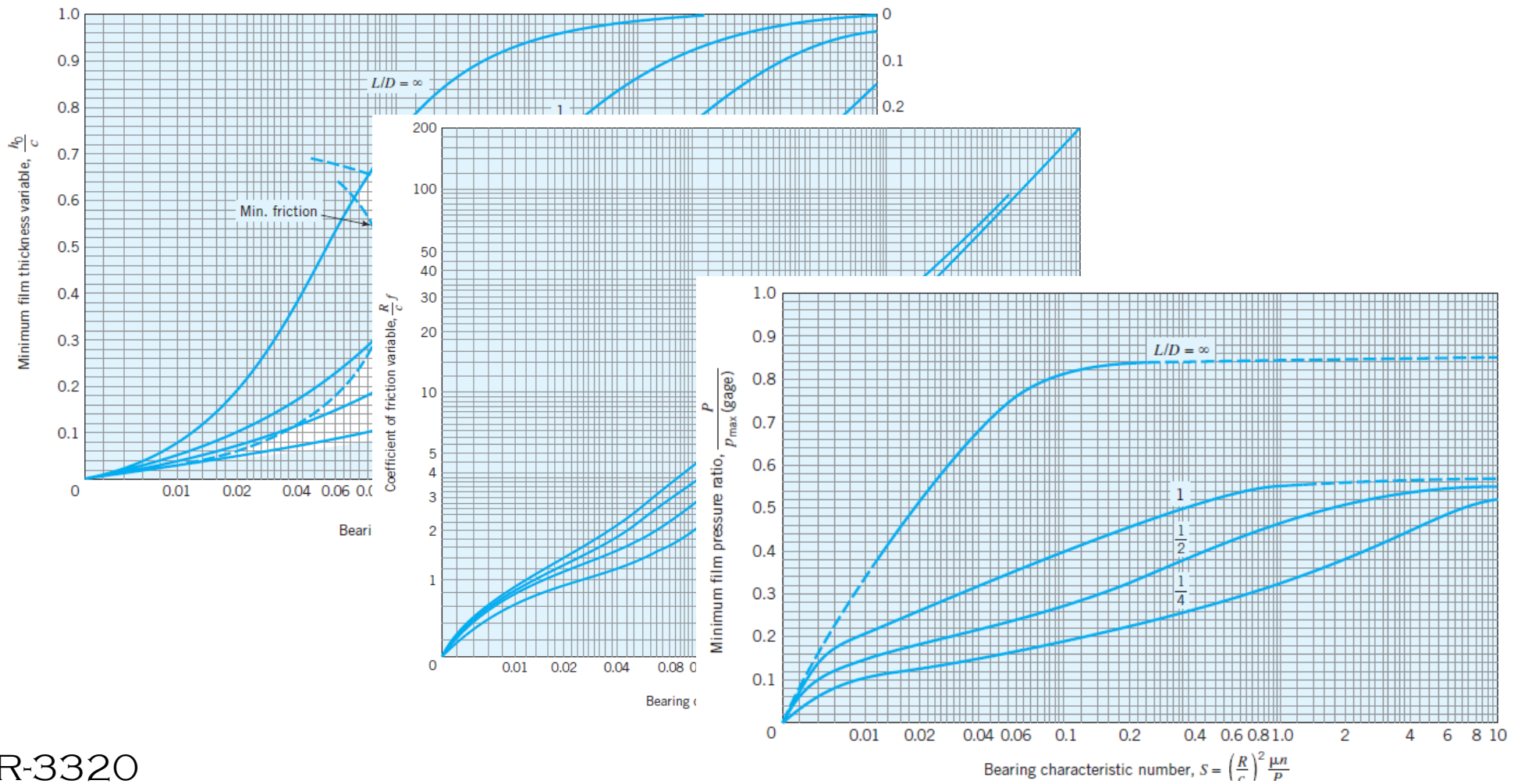




## Mancais hidrodinâmicos

$$S = \left(\frac{R}{c}\right) \frac{\mu n}{P}$$

Número característico



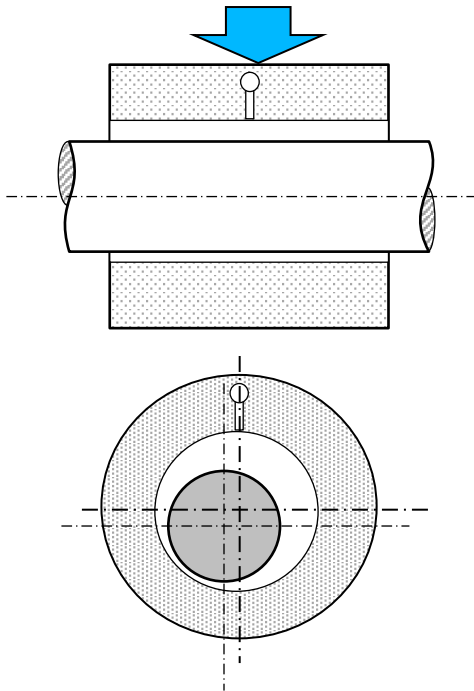




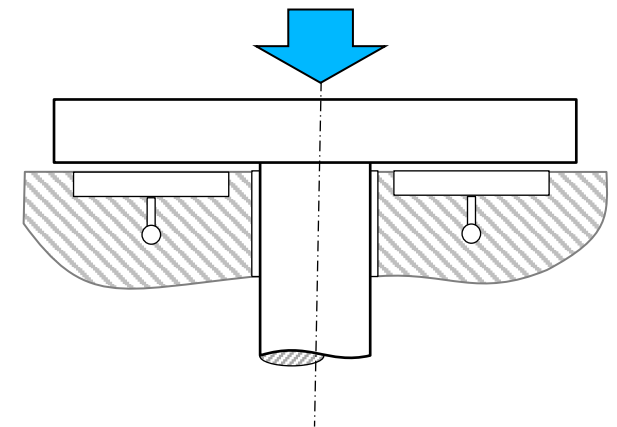
## Mancais hidrodinâmicos

carregamento

Radiais



Axiais

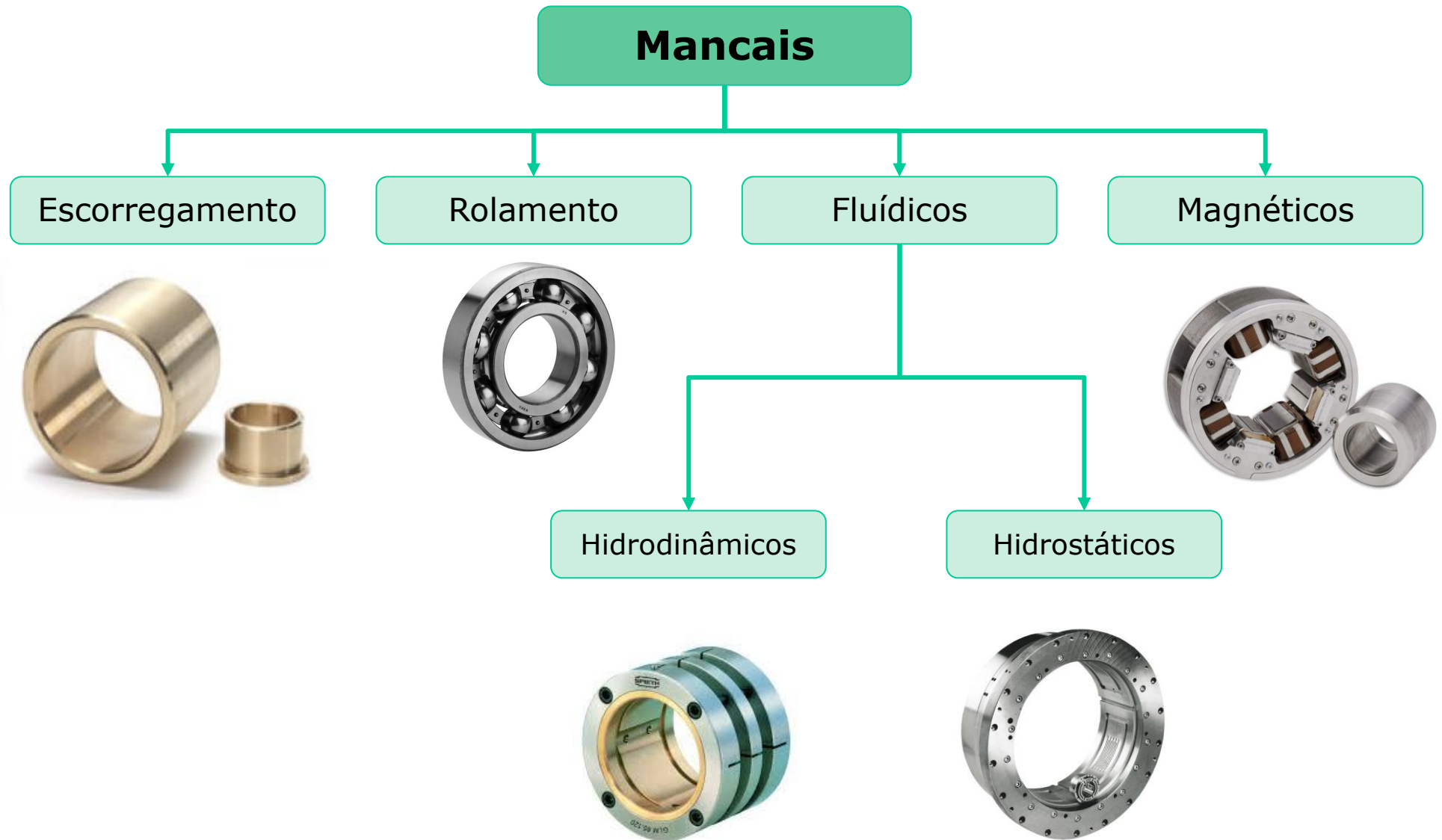




## Mancais hidrodinâmicos

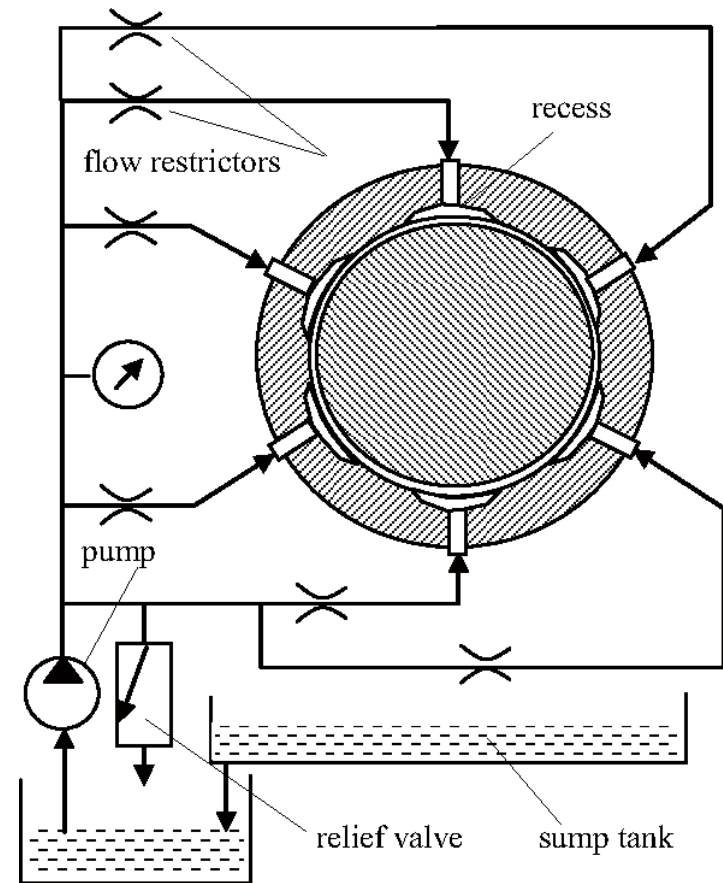
### Exemplos







## Mancais hidrostáticos





## Mancais hidrostáticos

### Características

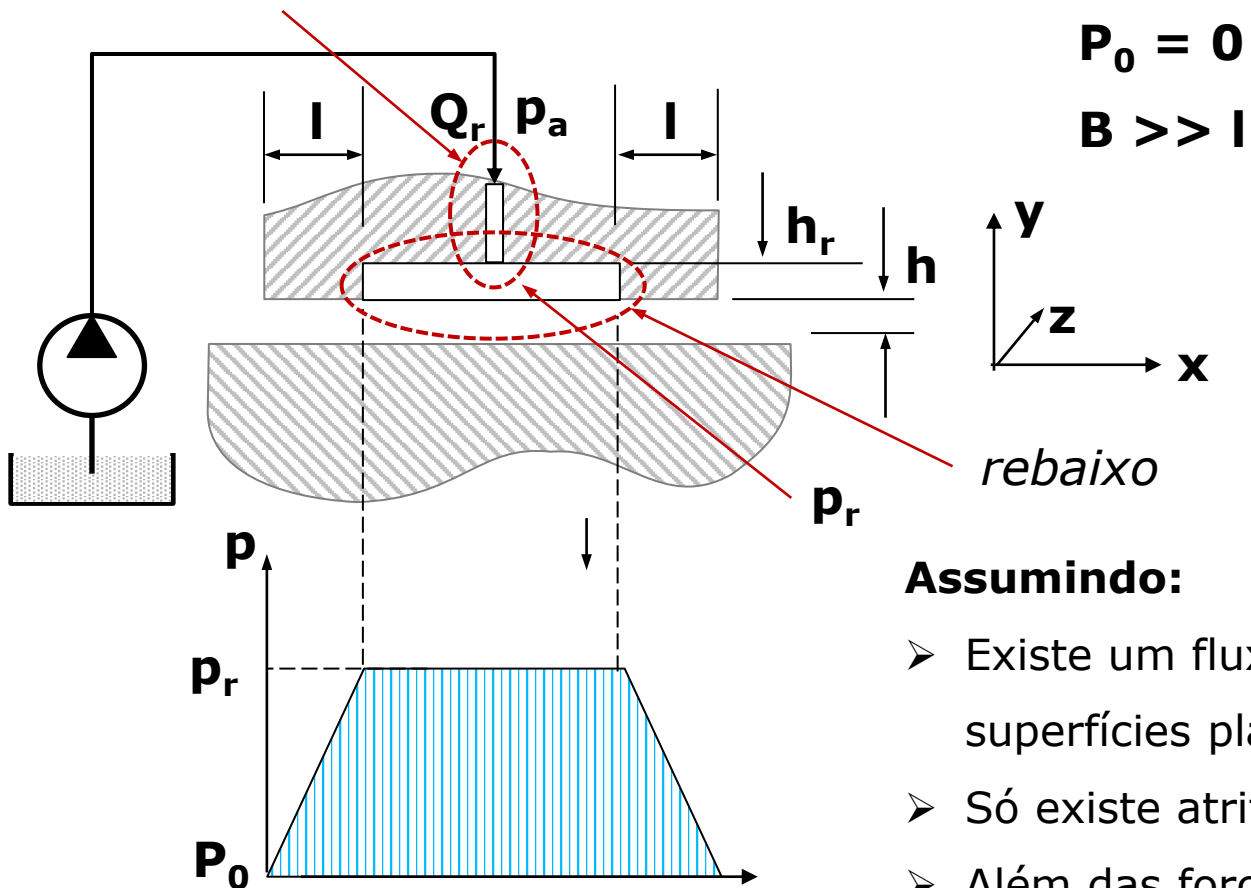


- Projeto complexo
- Fabricação complexa
- Baixa modularidade
- Sem atrito, desgaste e *stick-slip*
- Elevada capacidade de carga
- Sistemas de retorno e resfriamento
- Alta rigidez
- Elevado amortecimento
- Alta velocidade
- Problema de estabilidade térmica
- Elevada exatidão
- Amortecimento



## princípio de funcionamento

Restritor de fluxo

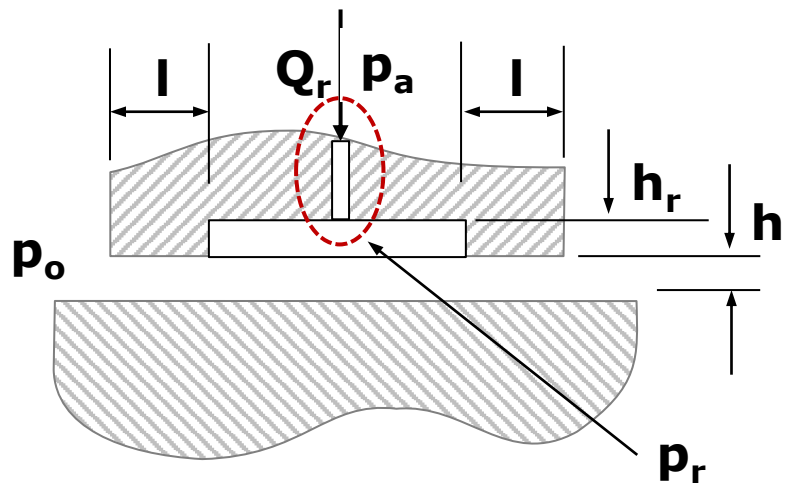


### Assumindo:

- Existe um fluxo laminar entre superfícies planas.
- Só existe atrito viscosos
- Além das forças de compressão, as forças de empuxo também devem ser levadas em consideração (squeeze film effect).



## princípio de funcionamento



### Restritor de fluxo

Orifício

Capilares

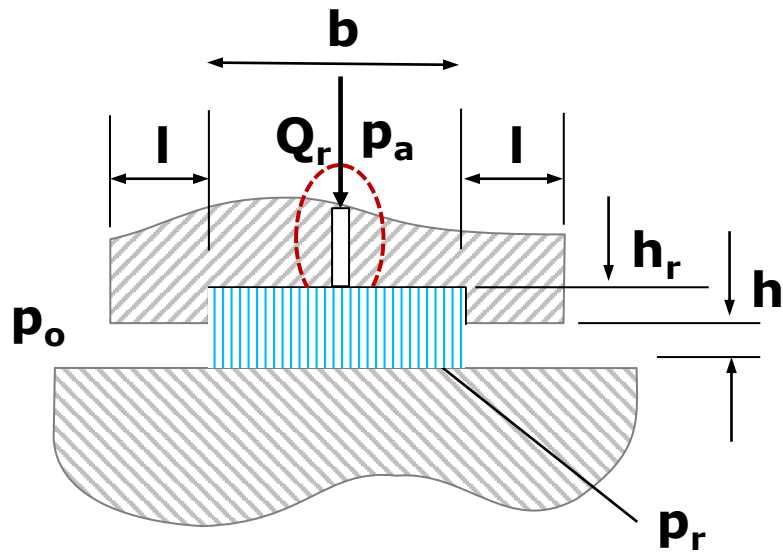
Flexíveis

Porosos

Outros



## princípio de funcionamento



### Fluxo em um restritor tipo orifício

$$Q_{r_o} = A_c C_{d_o} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_a - p_r)}$$

$$C_{d_{orifício}} \cong 0,80 \Rightarrow (0,6 \text{ a } 1,0)$$

$$Q_{r_o} = A_c C_{d_o} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_a - p_r)}$$

$C_{d_o}$  = Coeficiente de descarga

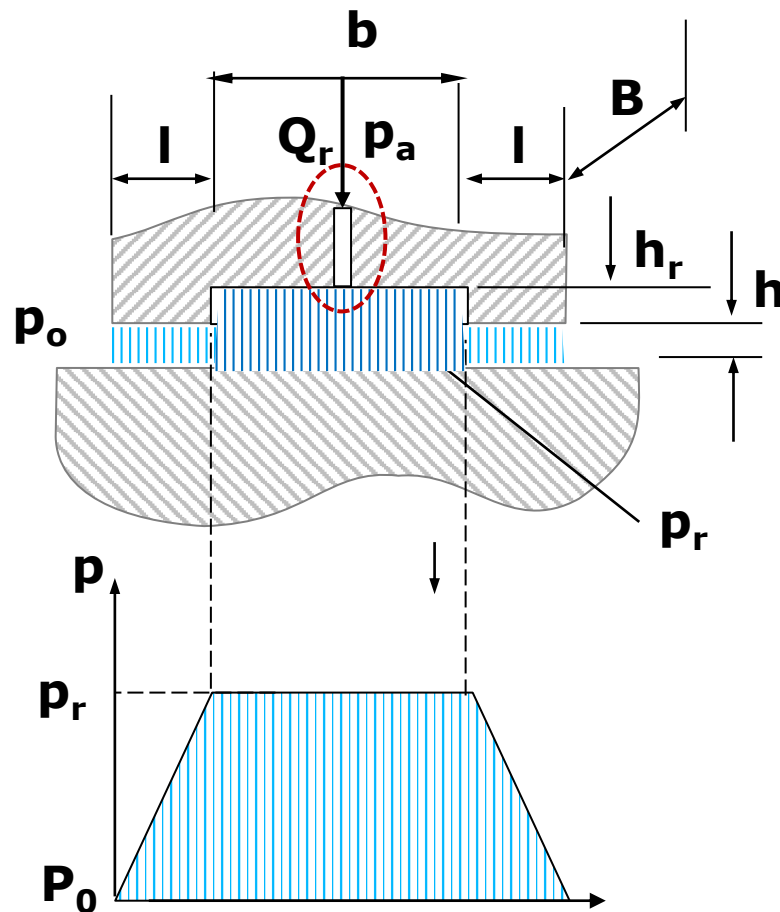
$A_c$  = Área do orifício

$Q_{r_o}$  = fluxo de fluido no restritor





## princípio de funcionamento



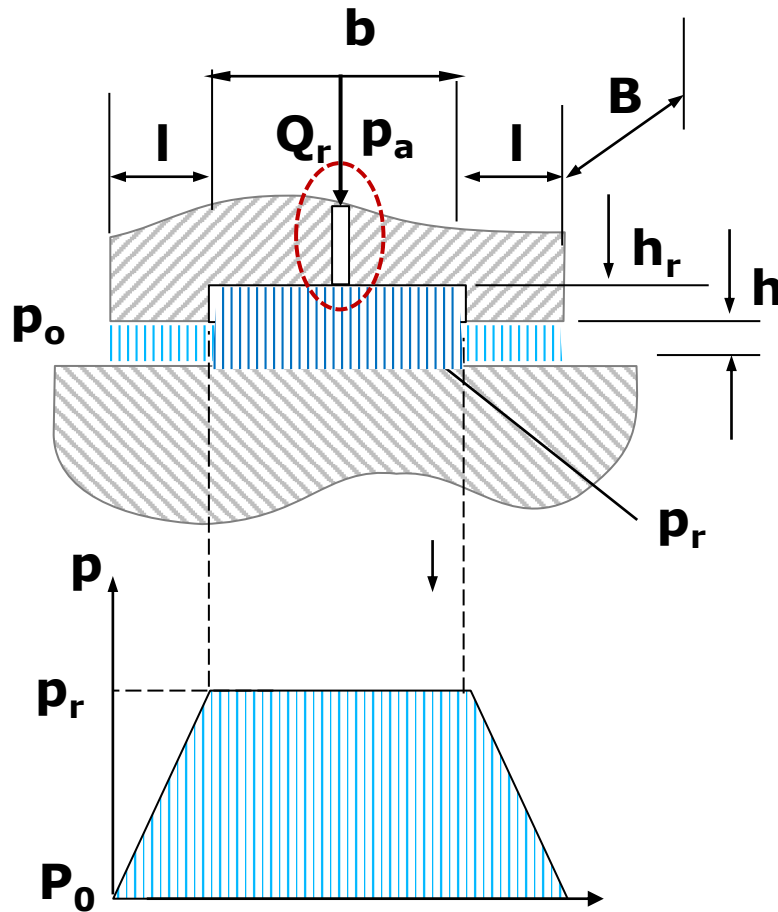
Capacidade de carga

$$W = B \left\{ p_r \frac{l}{2} + p_r b + p_r \frac{l}{2} \right\}$$

$$W = p_r B(l + b)$$



princípio de funcionamento



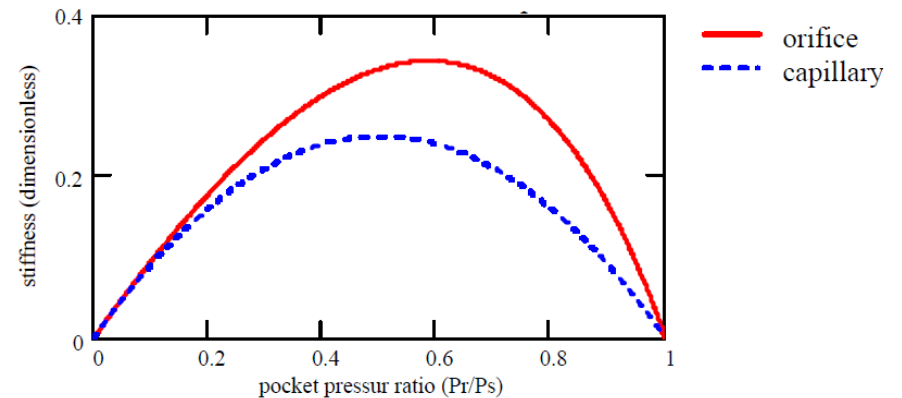
Rigidez

$$K = \frac{3B(l + b)}{h} \frac{p_r}{(Z + 1)}$$

$$Z = \frac{(p_r - p_a)}{a(p_s - p_r)}$$

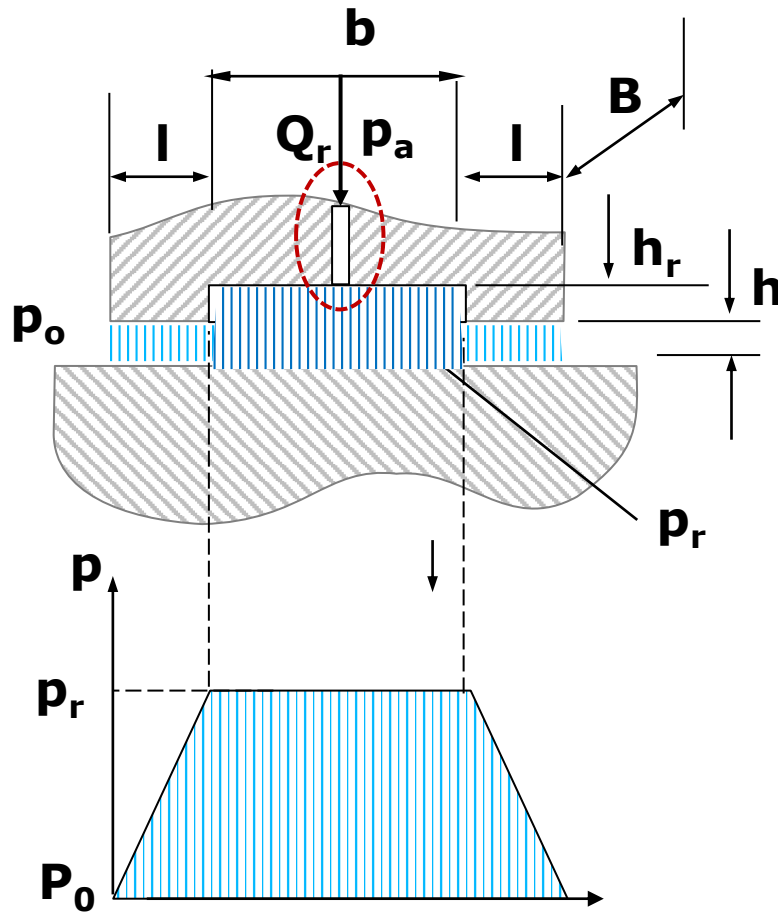
*a = 2 para restritor tipo orifício*  
*a = 1 para restritor tipo capilar*

Comparando - Orifício vs Capilar

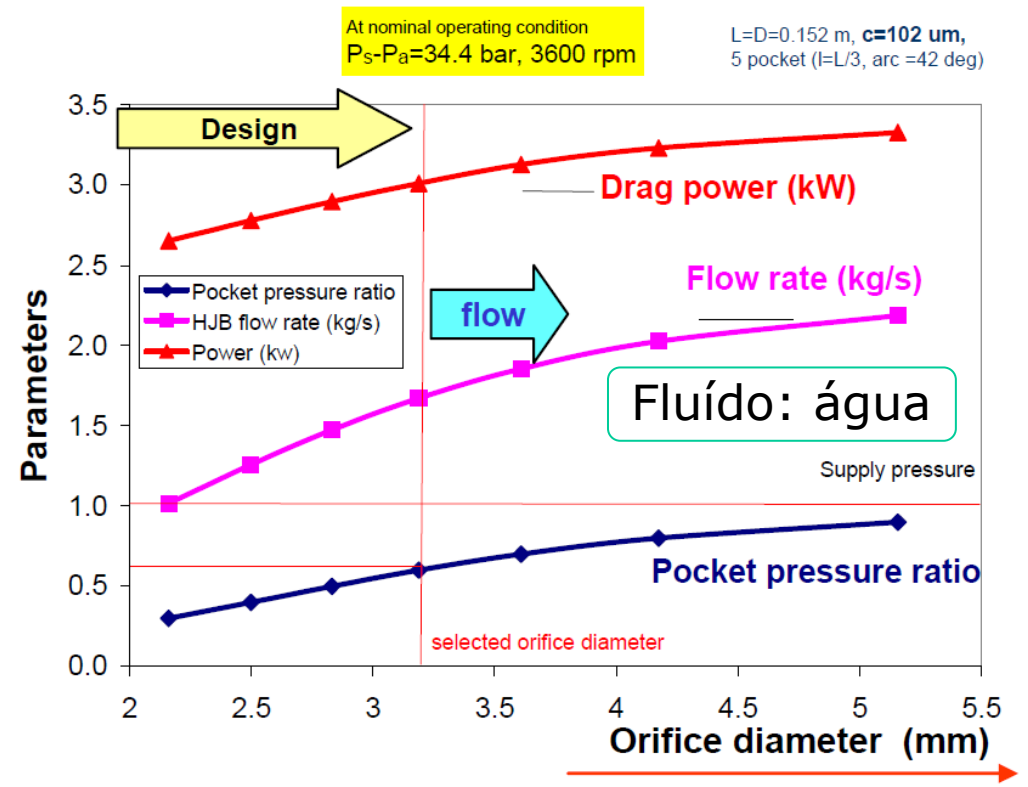




princípio de funcionamento



Efeito do diâmetro do orifício

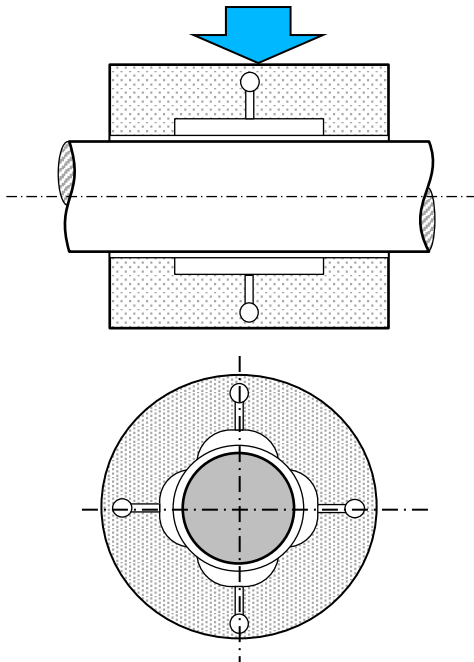




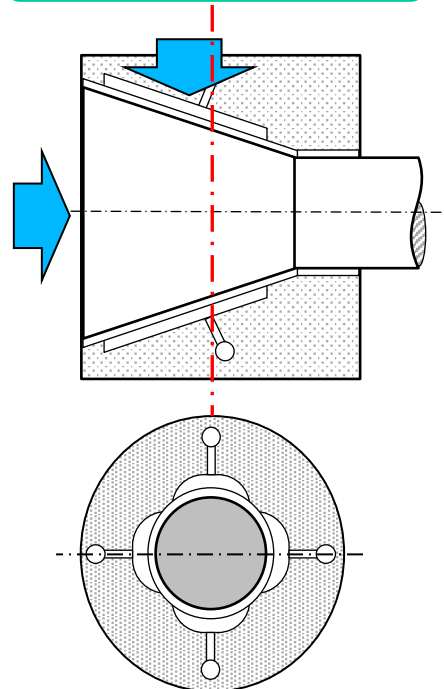
## Mancais hidrostáticos

carregamento

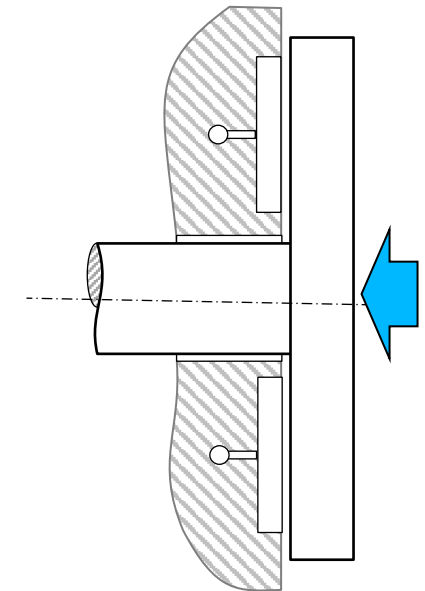
Radiais



Radiais/axiais



Axiais





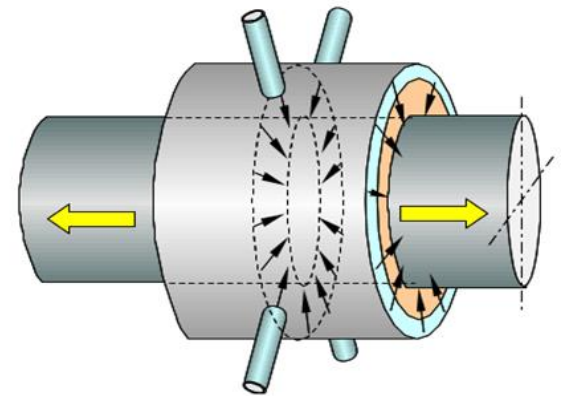
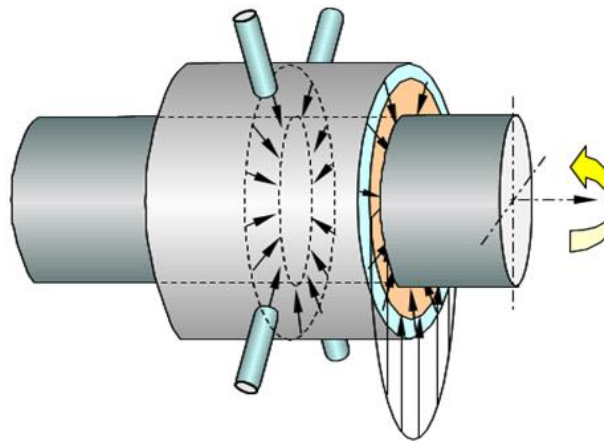
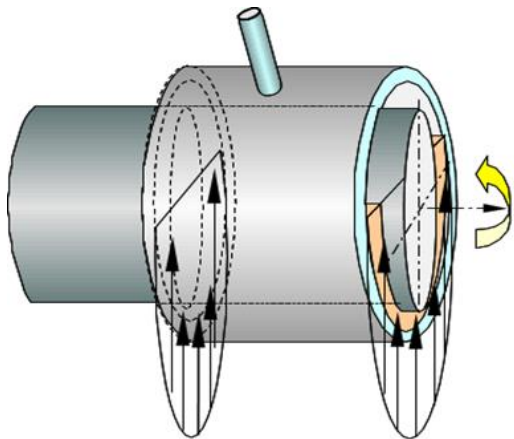
## Mancais hidrostáticos

carregamento

hidrodinâmicos

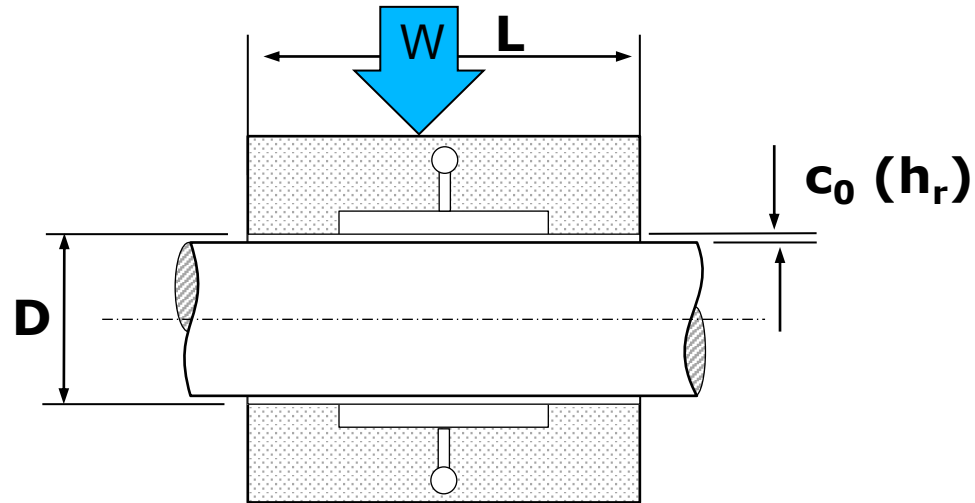
híbridos

hidrostáticos

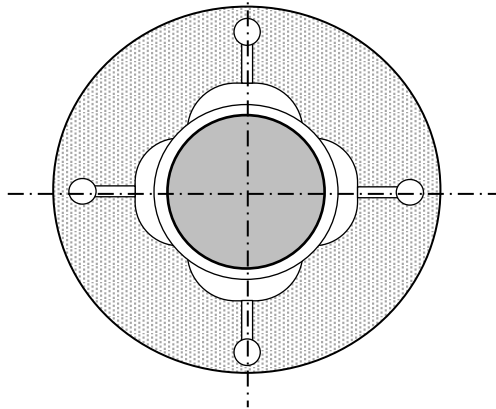




## Mancais hidrostáticos

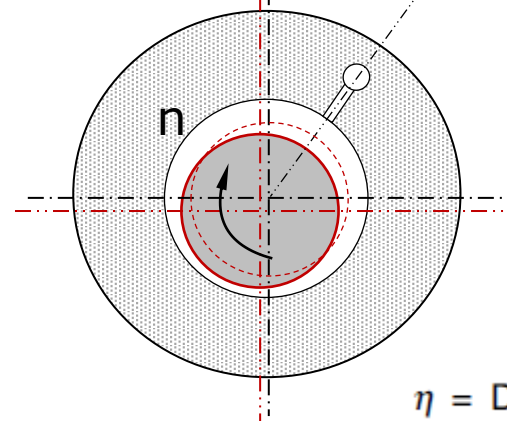


hidrostáticos



$$W = f(L D P_a)$$

hidrodinâmicos



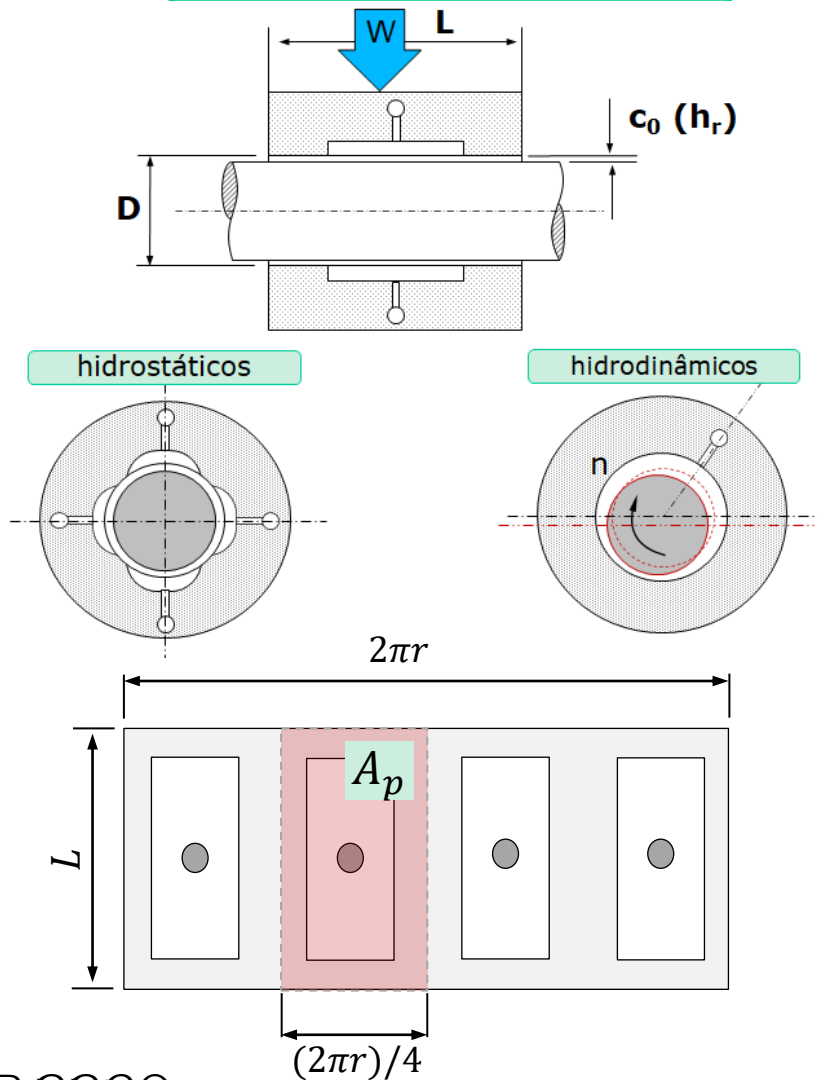
$\eta$  = Dynamic viscosity

$$W = f \left( L D n \eta \left[ \frac{D}{c_0} \right]^2 \right)$$



## Mancais hidrostáticos

### Dimensionamento



$$W = a_f A_p P_r$$

$$Q = q_f \frac{F}{A_p} \frac{c^3}{\mu}$$

$$P_a = P_r Q$$

$$P_a = H_f \left( \frac{F}{A_p} \right)^2 \left( \frac{c^3}{\mu} \right)$$

$W \Rightarrow$  capacidade de carga do mancal

$Q \Rightarrow$  fluxo no mancal

$P_a \Rightarrow$  pressão de alimentação (bomba)

$P_r \Rightarrow$  pressão no rebaixo

$a_f \Rightarrow$  coeficiente de carga

$q_f \Rightarrow$  coeficiente de fluxo

$H_f \Rightarrow$  coeficiente de potência

$A_p \Rightarrow$  área do Pad

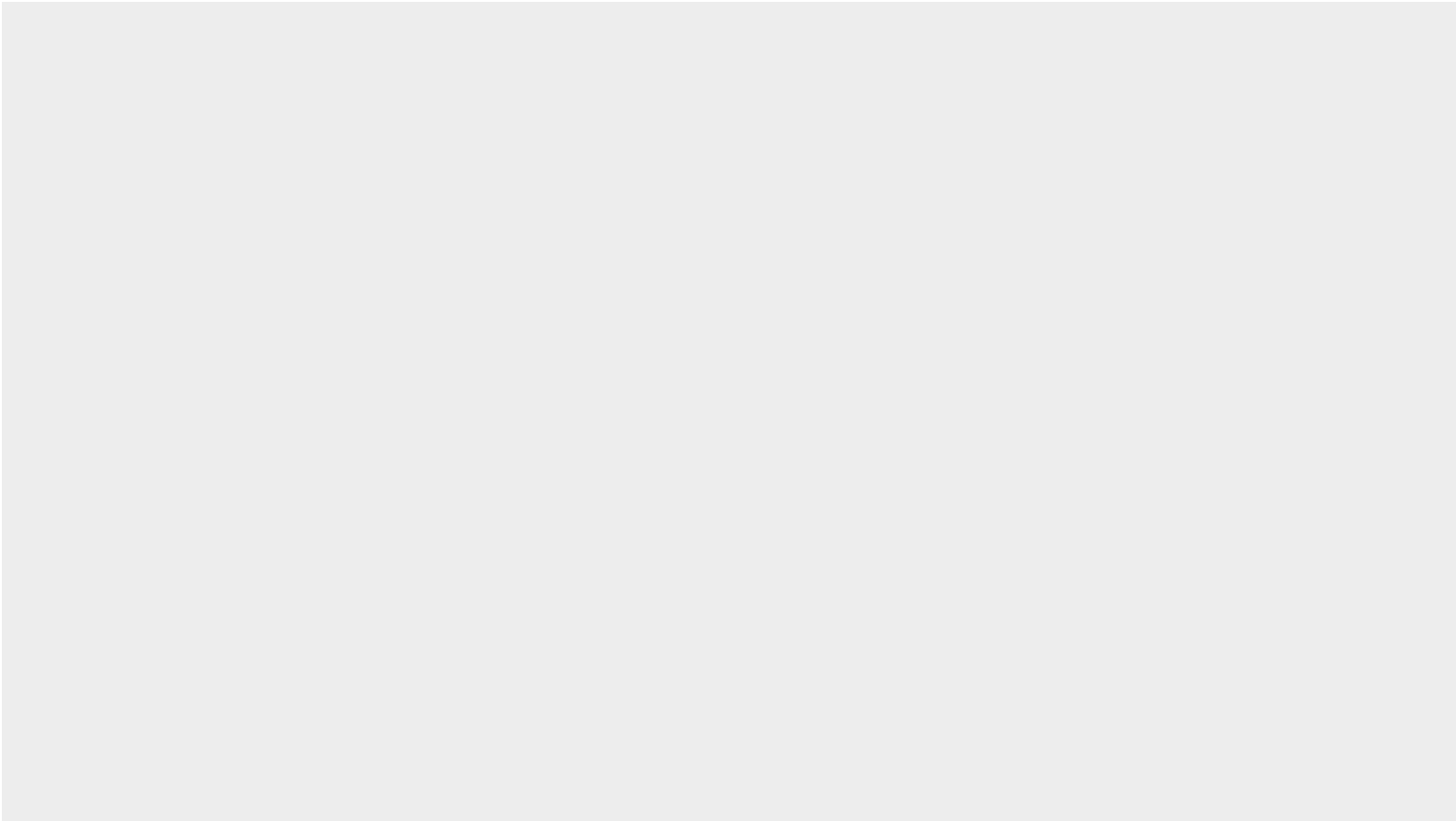
$c \Rightarrow$  folga

$c_0 \Rightarrow$  folga nominal

$\mu \Rightarrow$  viscosidade dinâmica do fluido



*Professional Instruments Hydrostatic spindle orientation demo*



<https://www.youtube.com/watch?v=PN1VExrOxTo&t=31s>

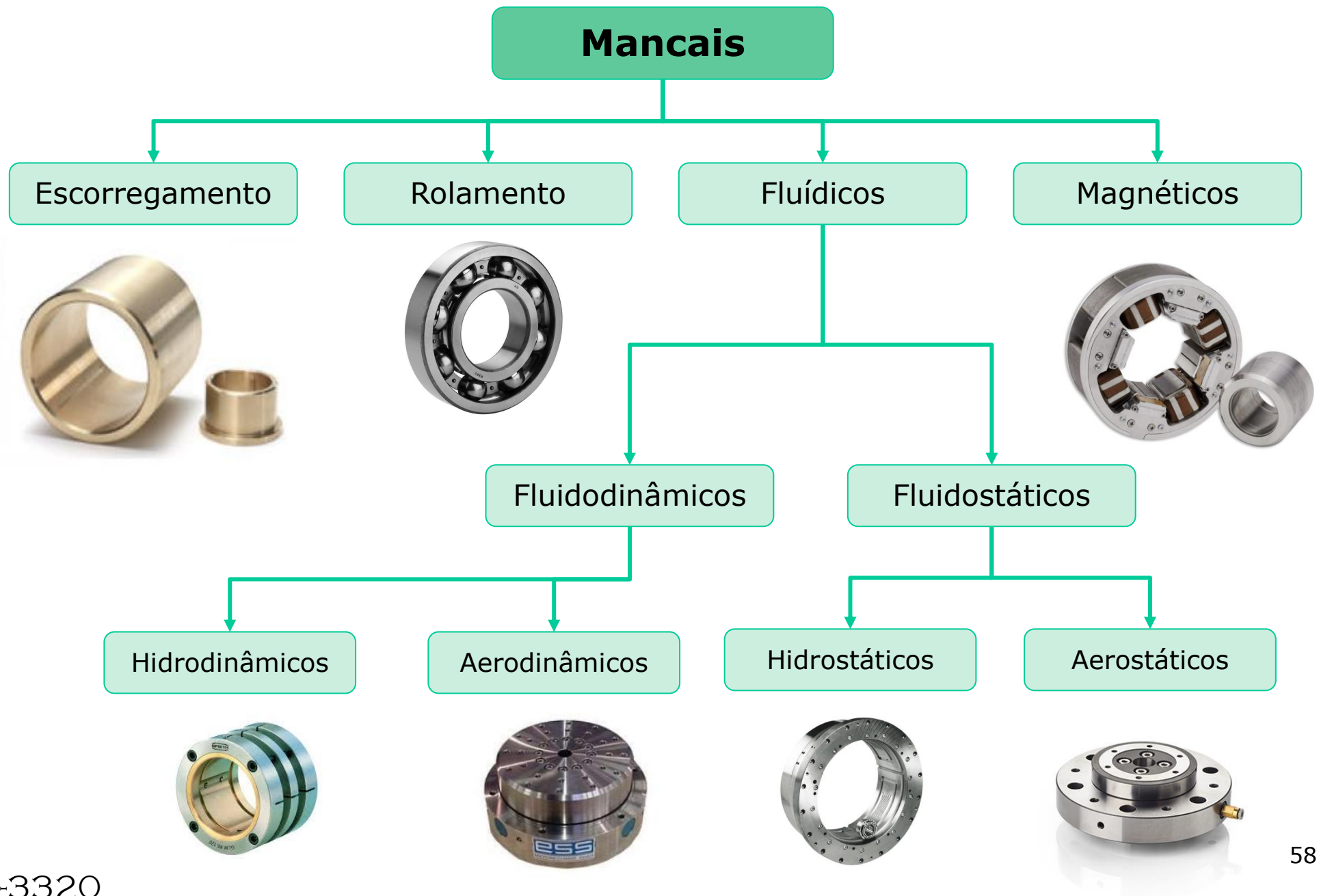




**Diamond Turning on a Professional Instruments Oil Hydrostatic Spindle**



<https://www.youtube.com/watch?v=6EsvHIRhuBE>





## Mancais magnéticos





## Mancais magnéticos

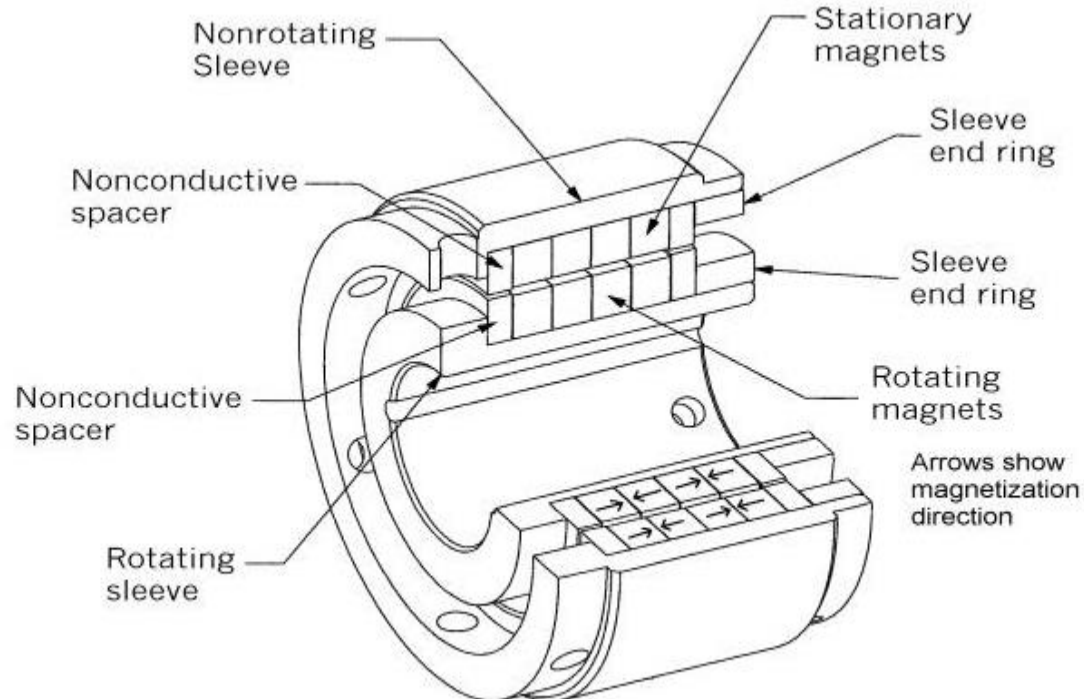
### Introdução

- Mancais magnéticos não tem contato mecânico
- Não tem limites de velocidade – segurança é o limite
- Podem ser lineares, rotativos ou combinados
- Back up mecânicos devem ser introduzidos prevendo falhas de energia
- Rigidez infinita, controlada eletronicamente
- Controle sofisticado
- Elevada capacidade de carga e rigidez



## Mancais magnéticos

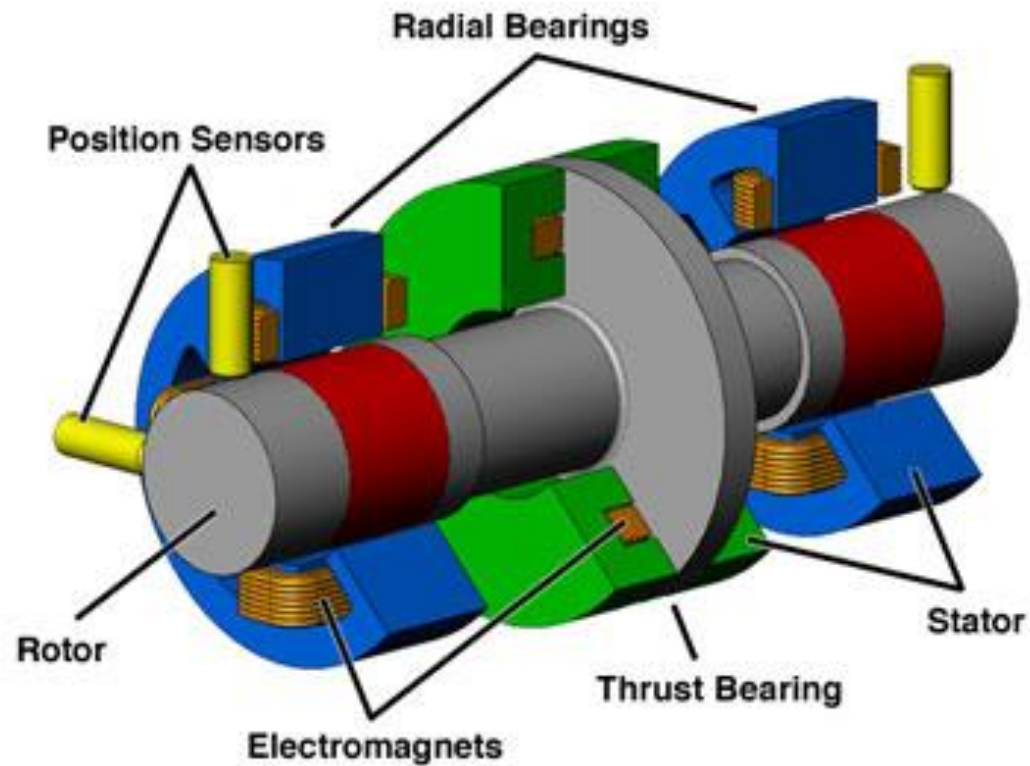
### Constituintes





## Mancais magnéticos

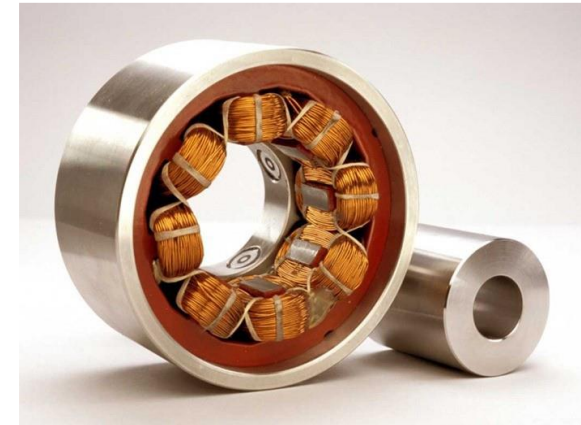
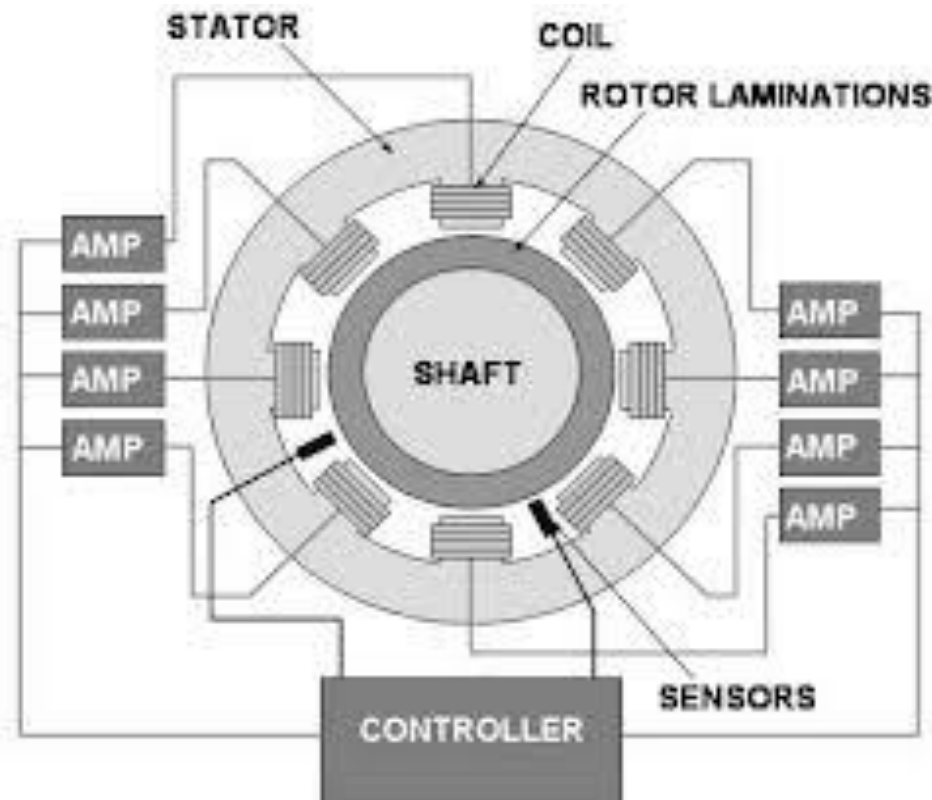
### Constituintes





## Mancais magnéticos

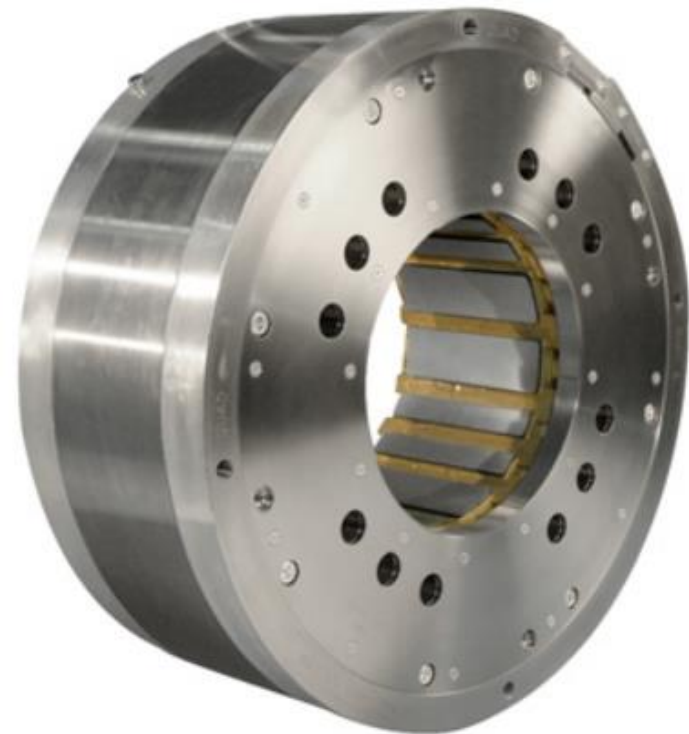
### Funcionamento





## Mancais magnéticos

### Exemplos



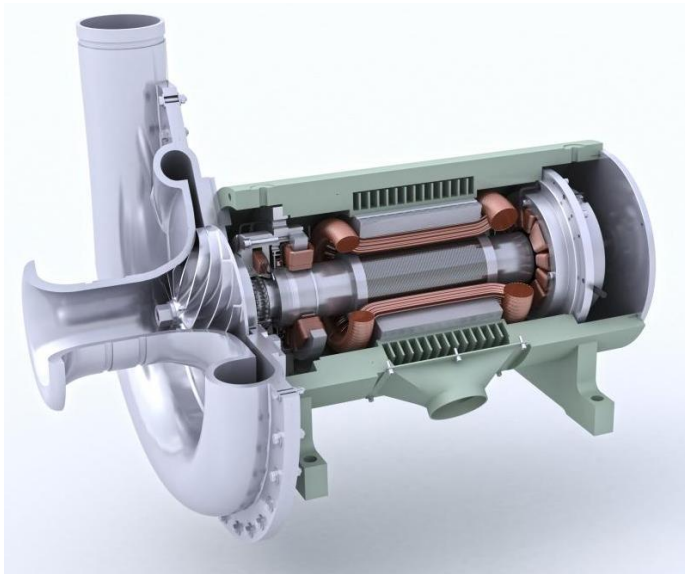




## Mancais magnéticos

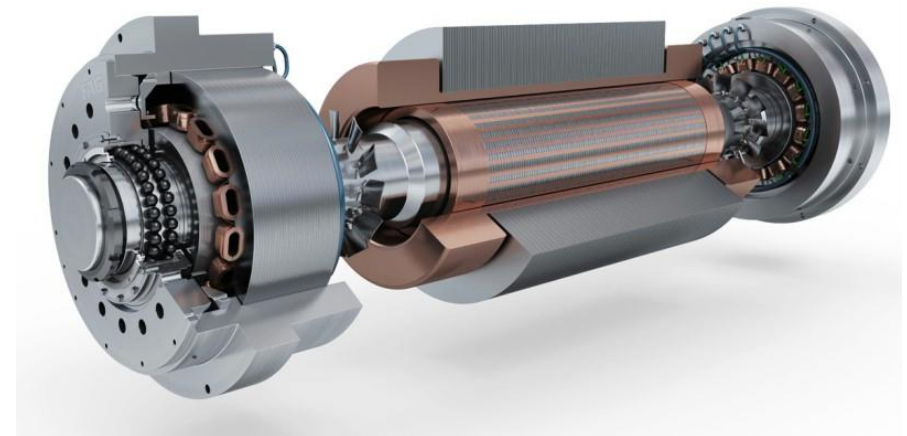
### Aplicação

Bombas de alto desempenho



<http://www.airbestpractices.com/technology/blowers/magnetic-bearings-attractive-force-energy-efficiency>

Árvore de máquinas-ferramentas

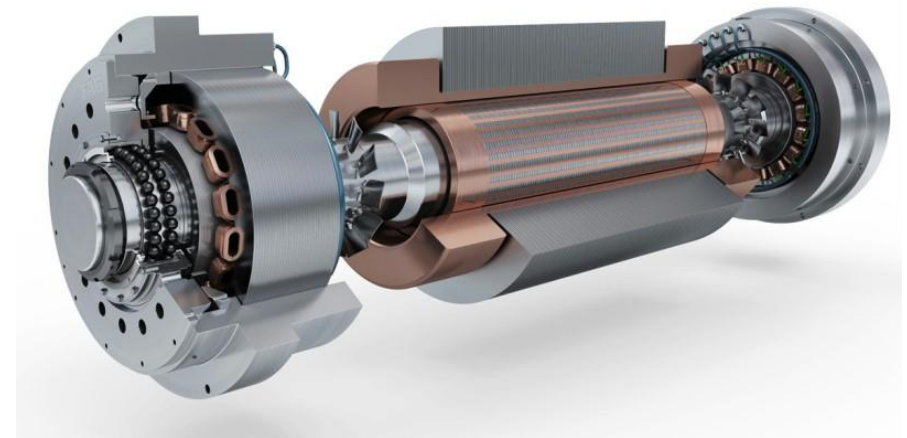
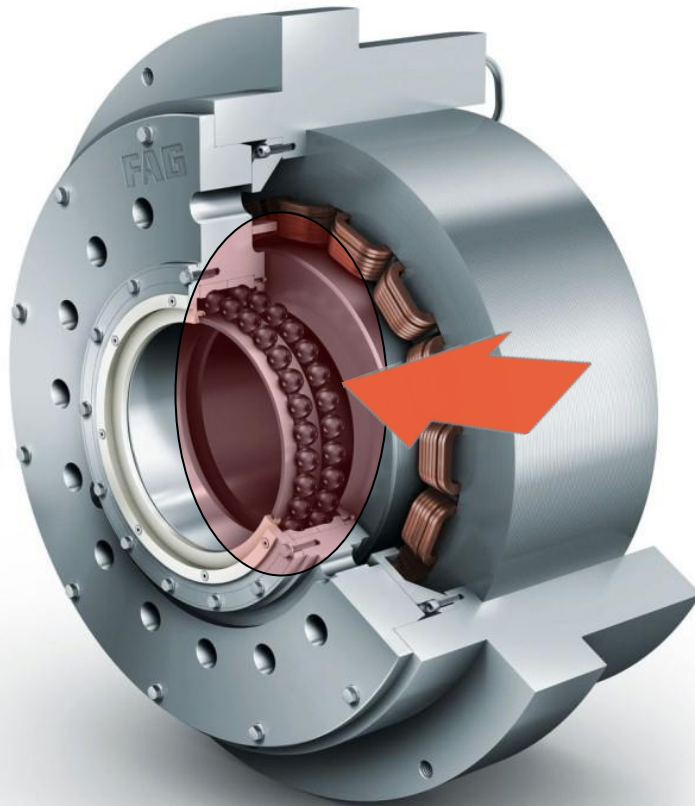


[http://m.schaeffler.de/content.mobile/en/press/pressdetail/press\\_detail.jsp?id=16452736](http://m.schaeffler.de/content.mobile/en/press/pressdetail/press_detail.jsp?id=16452736)



Mancais magnéticos

Sistema de segurança





**FIM DA AULA**