



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

# Elementos de Máquinas para Automação

**PMR 3307 – A28**

**Guias lineares**

**2020.2**



## Cronograma de aulas

Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
18.08	3ª	A1	<b>Introdução a disciplina</b> Modelagem, carregamento e equilíbrio	RS
21.08	6ª	A2	Comportamento mecânico dos materiais	RS
25.08	3ª	A3	Composição de tensões Estado plano de tensões – Círculo de Mohr	RS
28.08	6ª	A4	Teorias de Falha: 1) Falha por deformação excessiva; fundamentos	RS
01.09	3ª	A5	Teorias de Falha: 2) Falha por deformação permanente: von Mises, Tresca, Coulomb-Mohr;	RS
04.09	6ª	A6	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 1	RS
08.09	3ª	A7	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 2	RS
11.09	6ª	A8	Teorias de Falha: 4) Falha por instabilidade: flambagem	RS
15.09	3ª	A9	Teorias de Falha: 5) Falha por impacto: Parte - 1	RS
18.09	6ª	A10	Teorias de Falha: 6) Falha por impacto: Parte - 2	RS
22.09	3ª	A11	Teorias de Falha: 6) Falha por desgaste excessivo	RS
25.09	6ª	A12	Fixações cubo-eixo	NG
29.09	3ª	A13	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Rebites	NG
02.10	6ª	A14	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 1	NG
06.10	3ª	A15	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 2	NG
09.10	6ª	A16	Especificação e dimensionamento de elementos de transmissão: Fusos	NG
13.10	3ª	A17	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 1	NG
16.10	6ª	A18	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 2	NG
20.10	3ª	A19	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 1	NG
23.10	6ª	A20	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 2	NG
27.10	3ª	A21	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Freios e embreagens	NG
30.10	6ª	A22	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Correias e Correntes	NG
03.11	3ª	A23		RS
06.11	6ª	A24	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 1	RS
10.11	3ª	A25	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 2	RS
13.11	6ª	A26	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 3	RS
17.11	3ª	---	<b>Feriado municipal – Consciência Negra</b>	
20.11	6ª	A27	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias de escorregamento	RS
24.11	3ª	A28	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias lineares	RS
27.11	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	RS
01.12	3ª	A30	Apresentação dos trabalhos	
04.12	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	
08.12	3ª	A30		
11.12	6ª	A31		
14.12	2ª		<b>Encerramento do semestre 2020-2</b>	



## Introdução

### Mancais e Guias

#### 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.

#### Guias



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



## Guias

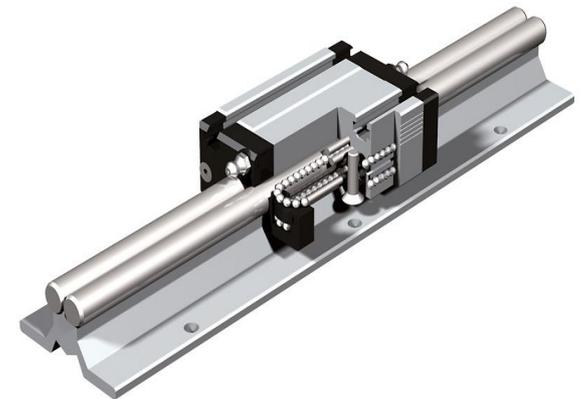
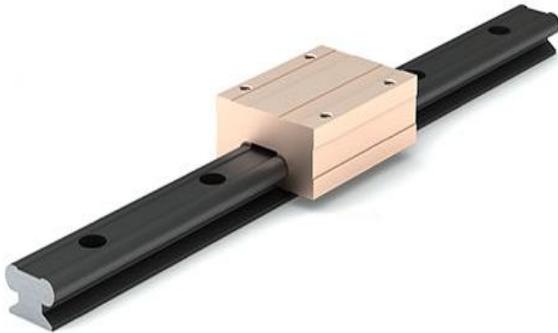
### Classificação

Escorregamento

A filme fluido

Elementos rolantes

hidrostáticas



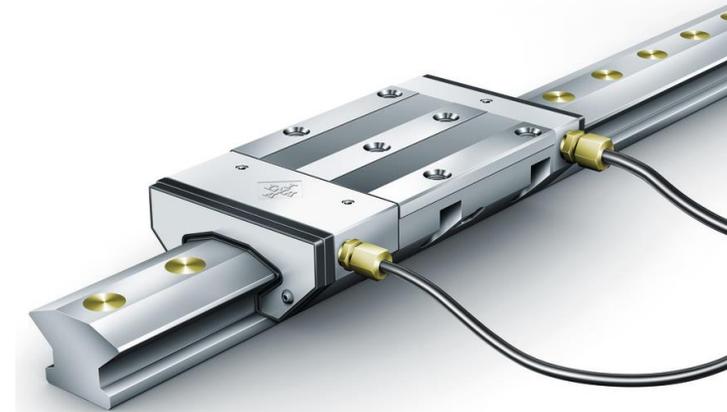


## Guias

**Hoje!**

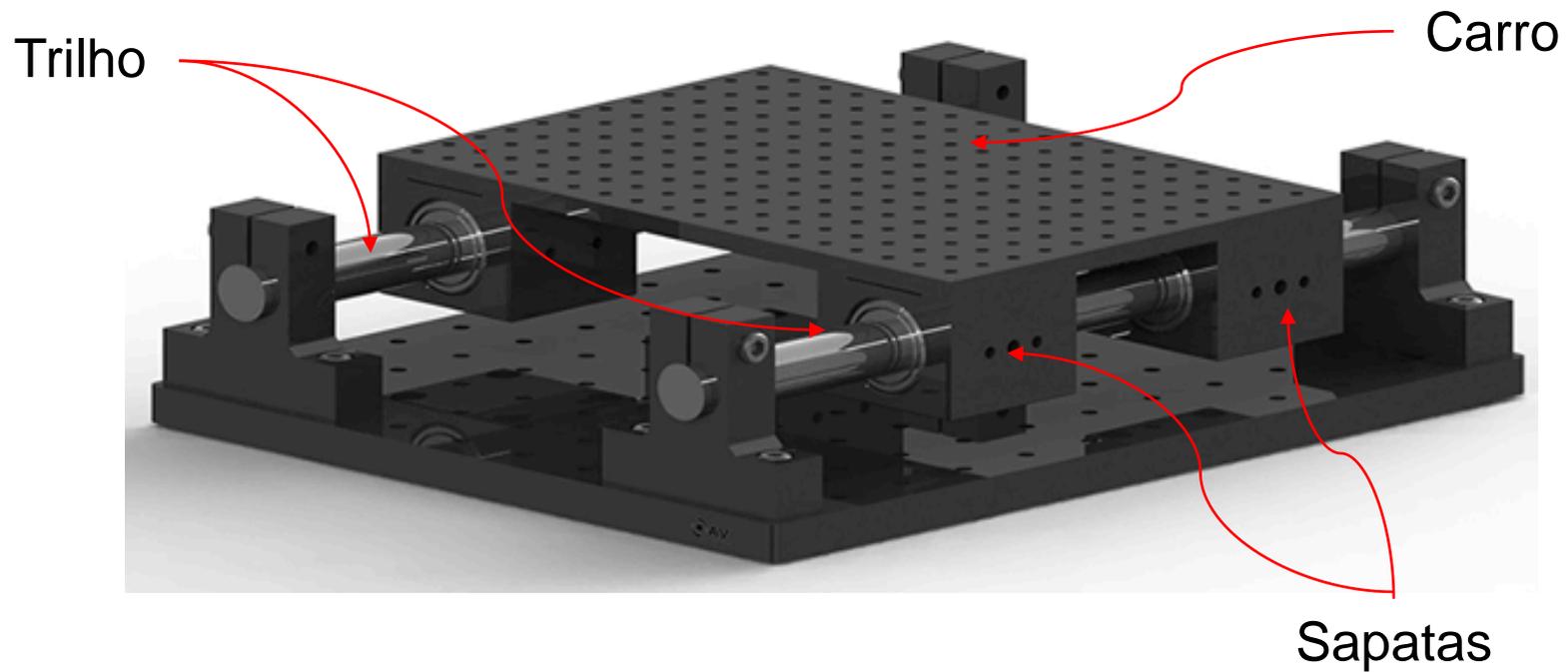
de elementos rolantes

hidrostáticas





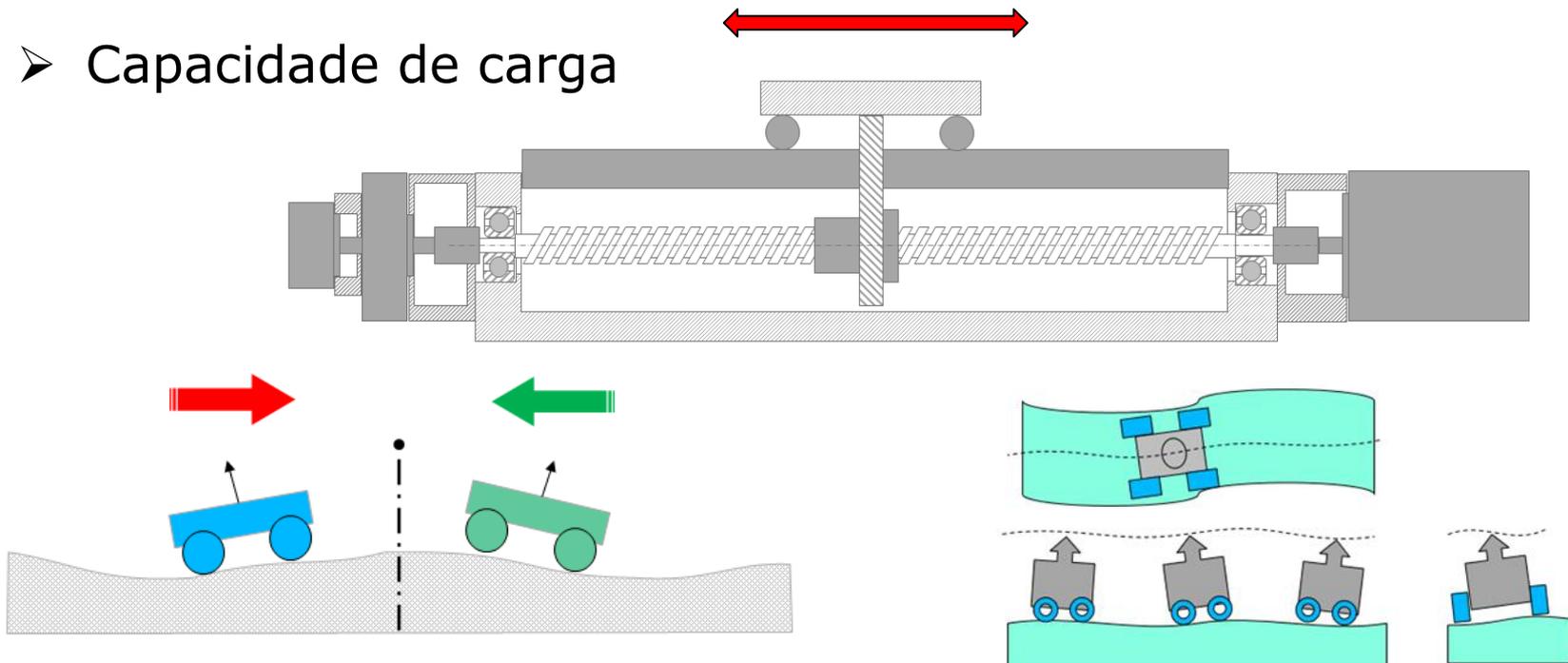
## Constituintes de um guia genérica





## Requisitos de um guia

- Movimento geometricamente precisos
- Posicionamento preciso e exato  $\Rightarrow$  controlabilidade
- Movimento suave
- Capacidade de carga





## Requisitos de um guia

- rigidez
- velocidade de trabalho
- do tipo e intensidade dos carregamentos
- dimensões para instalação
- confiabilidade
- manutenibilidade
- adaptabilidade as condições de operação
- custos
- Desgaste
- amortecimento





## Guias de elementos rolantes

### Características

- maior precisão de posicionamento
- Atrito de rolamento  $1/6$  do atrito de escorregamento
- maior velocidade de avanço, permitindo um aumento de produtividade de 20 a 30%
- exatidão pode ser mantida por longos períodos
- Movimento sem *stick-slip*
- fácil instalação e manutenção
- suavidade de movimento
- Alta modularidade



## Guias de elementos rolantes

### Classes de precisão

Preloaded Assembly (Non-interchangeable)					Interchangeable
Ultra precision	Super precision	High precision	Precision	Normal	Normal
P3	P4	P5	P6	PN	PC

Grade	NSK		THK	IKO		HIWIN		STAR
	Preloaded assembly	Interchangeable type		Non-interchangeable type	Interchangeable type	Non-interchangeable type	Interchangeable type	
Normal	PN	PC	No code	No code	(No code)	C	C	N
Precision	P6	–	H	H	H	H	H	H
High precision	P5	–	P	P	P	P	P	P
Super precision	P4	–	SP	SP	–	SP	–	SP
Ultra precision	P3	–	UP	UP	–	UP	–	UP

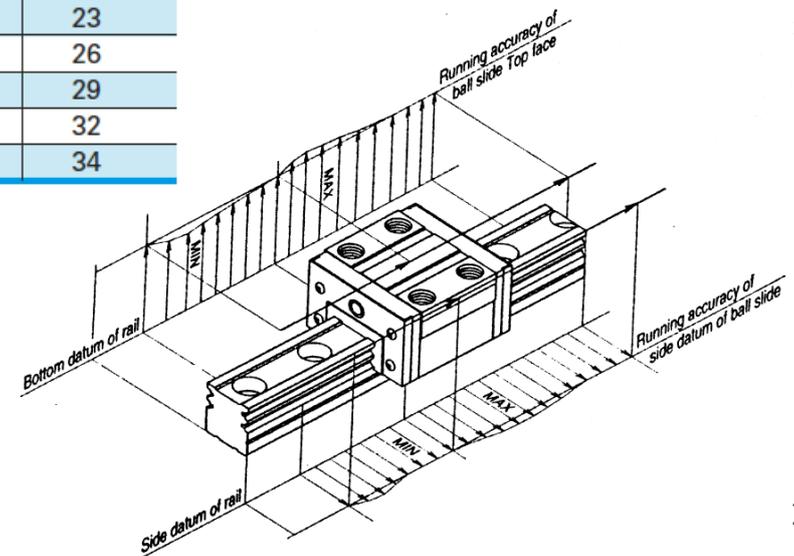


## Erro de paralelismo - NSK

Table 4.2 Running parallelism of slide

Unit:  $\mu\text{m}$

Accuracy grade		Preloaded assembly (not random matching)					Random-matching type	
		Ultra precision P3	Super precision P4	High precision P5	Precision grade P6	Normal grade PN	Precision grade PH	Normal grade PC
Rail length (mm)	over							
	or less							
	– 50	2	2	2	4.5	6	2	6
	50 – 80	2	2	3	5	6	3	6
	80 – 125	2	2	3.5	5.5	6.5	3.5	6.5
	125 – 200	2	2	4	6	7	4	7
	200 – 250	2	2.5	5	7	8	5	8
	250 – 315	2	2.5	5	8	9	5	9
	315 – 400	2	3	6	9	11	6	11
	400 – 500	2	3	6	10	12	6	12
	500 – 630	2	3.5	7	12	14	7	14
	630 – 800	2	4.5 (4)	8	14	16	8	16
	800 – 1 000	2.5	5 (4.5)	9	16	18	9	18
	1 000 – 1 250	3	6 (5)	10	17	20	10	20
	1 250 – 1 600	4	7 (6)	11	19	23	11	23
	1 600 – 2 000	4.5	8 (7)	13	21	26	13	26
	2 000 – 2 500	5	10 (8)	15	22	29	15	29
	2 500 – 3 150	6	11 (9.5)	17	25	32	17	32
	3 150 – 4 000	9	16	23	30	34	23	34



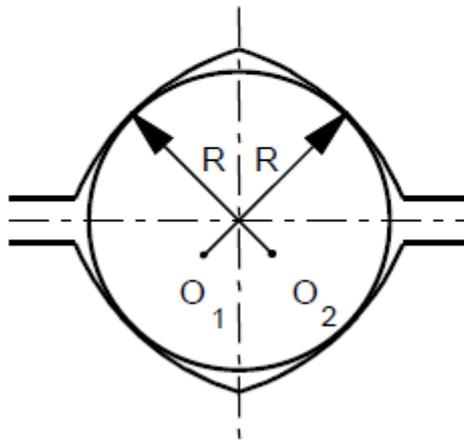


## Guias de elementos rolantes

### Tipo de perfiz das ranhuras

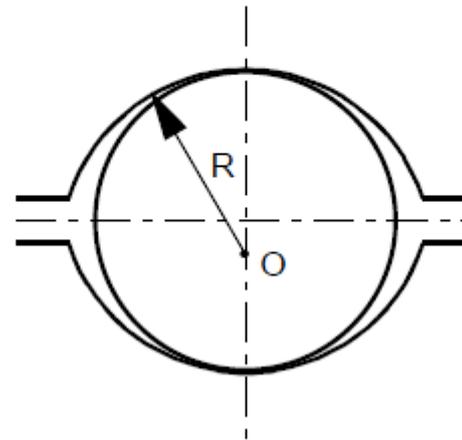
#### Gothic arch groove

(Consists of two arcs centered at  $O_1$  and  $O_2$ .)



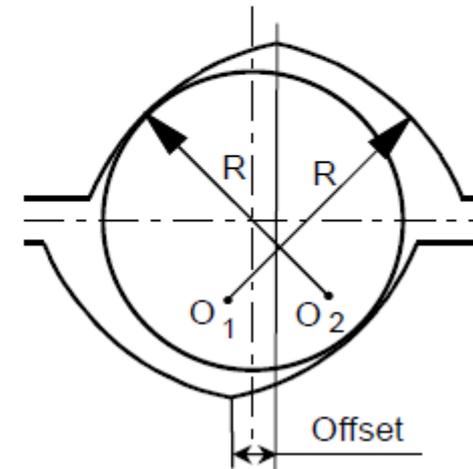
#### Circular arc groove

(Consists of one arc.)



#### Offset gothic arch groove

(Gothic arch groove of a rail is offset with that of a ball slides.)

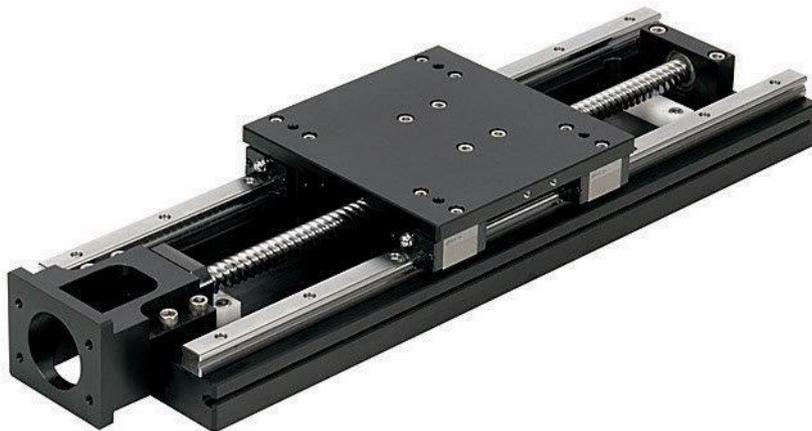




## Guias de elementos rolantes

Classificação quanto as direções do movimento

Simplex



Cruzadas





## Guias de elementos rolantes

As guias de elementos rolantes normalmente denominadas de guias lineares, são amplamente utilizadas em sistema de precisão.

- Podem ser de projeto específico ou comerciais

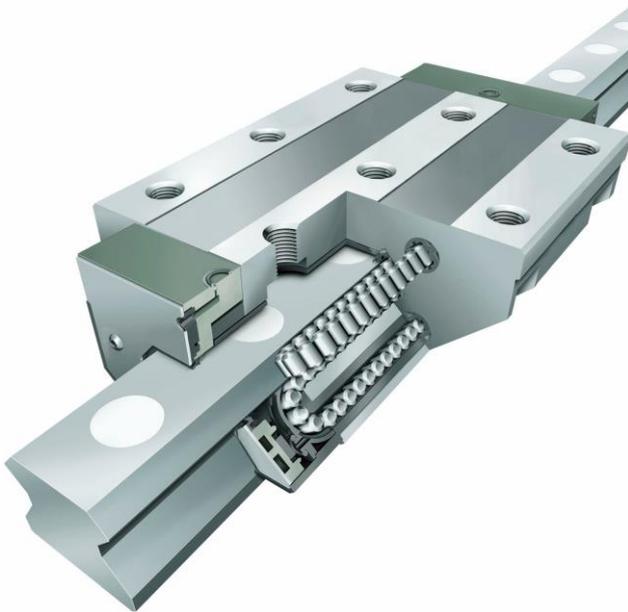




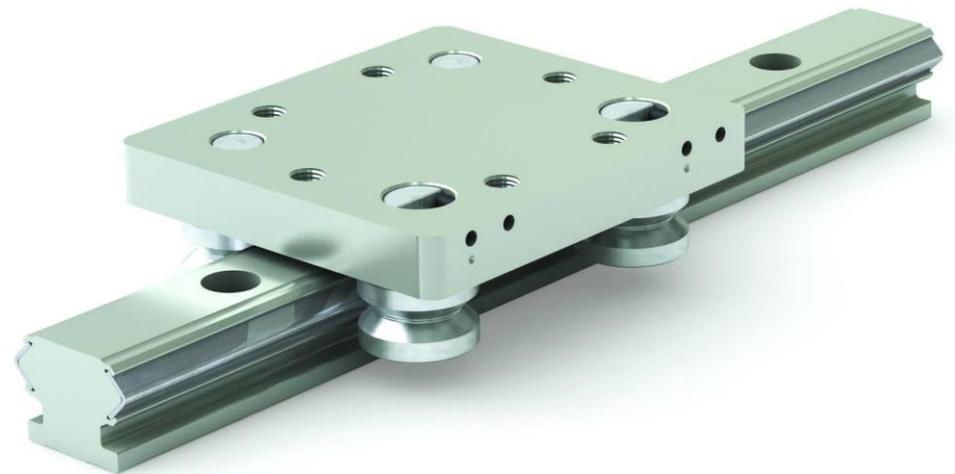
## Guias de elementos rolantes

Formas construtivas

Elementos internos



Elementos externos



<http://www.pbclinear.com/Blog/Easy-Access-Preload-Adjustment-Feature-Patented>



## Guias de elementos rolantes

Classificação quanto ao padrão do movimento

Linear

Circular





## Guias de elementos rolantes

Formas construtivas

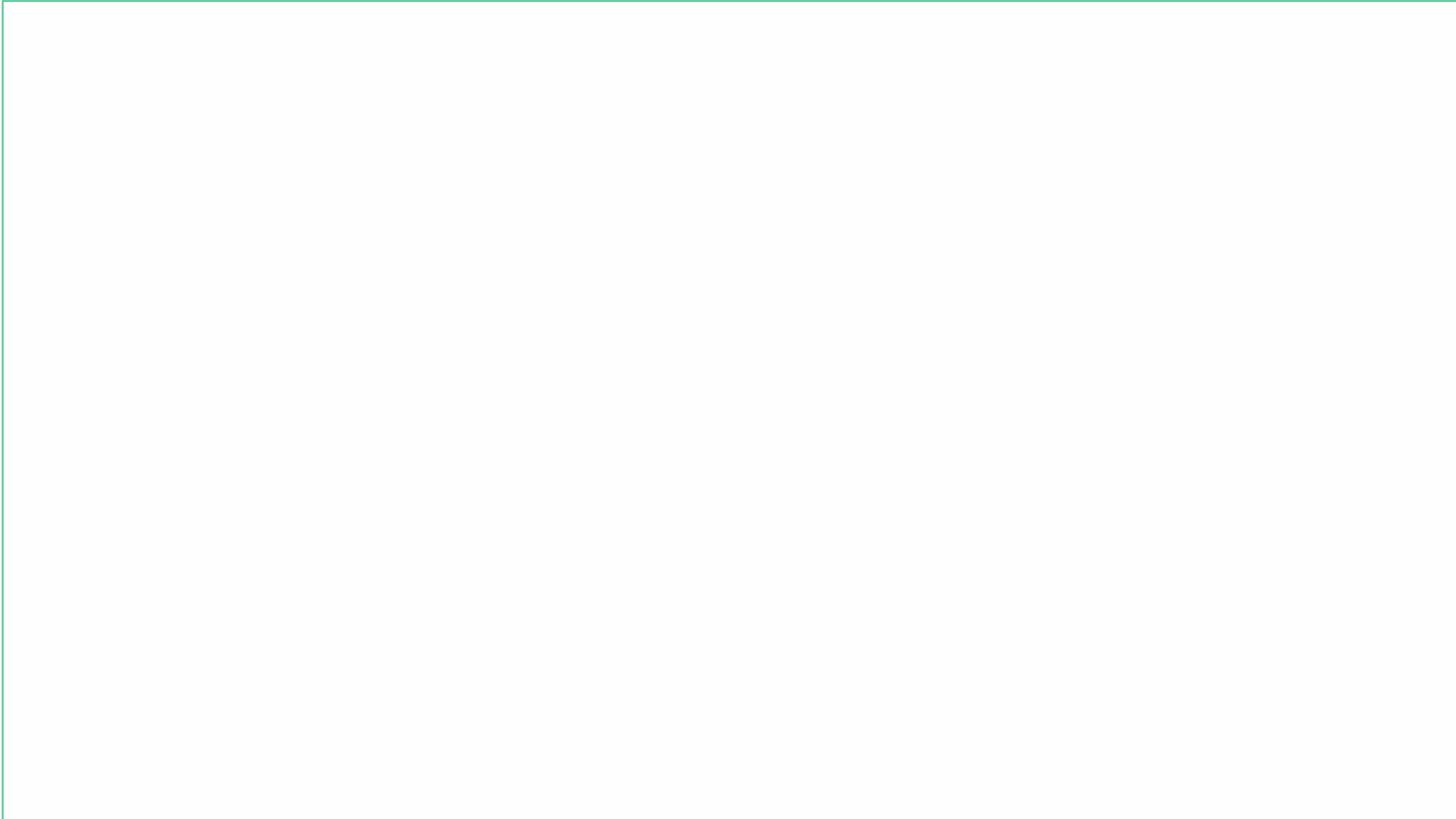
cilíndricas

prismáticas





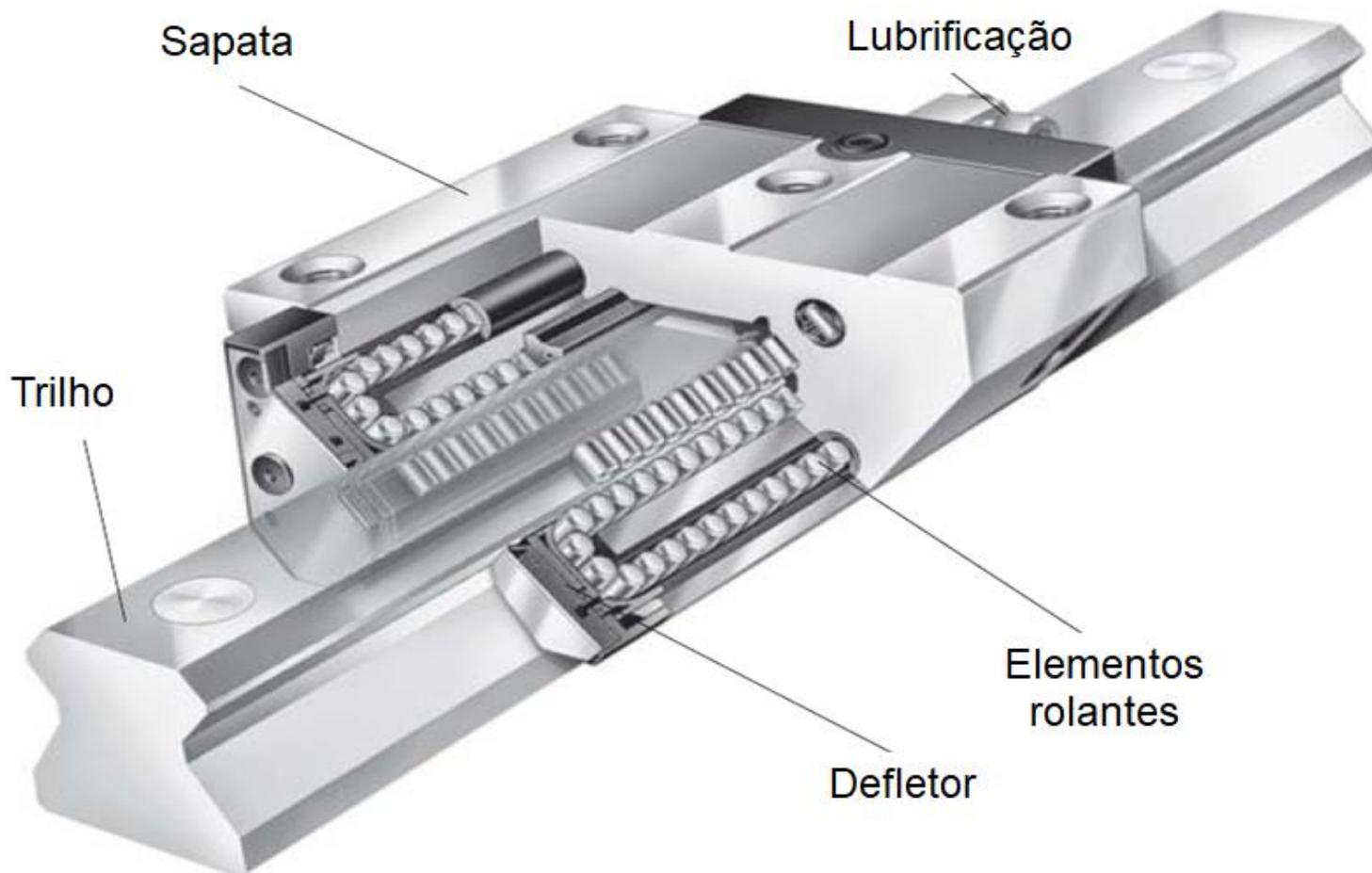
## Guias de elementos rolantes





## Guias de elementos rolantes

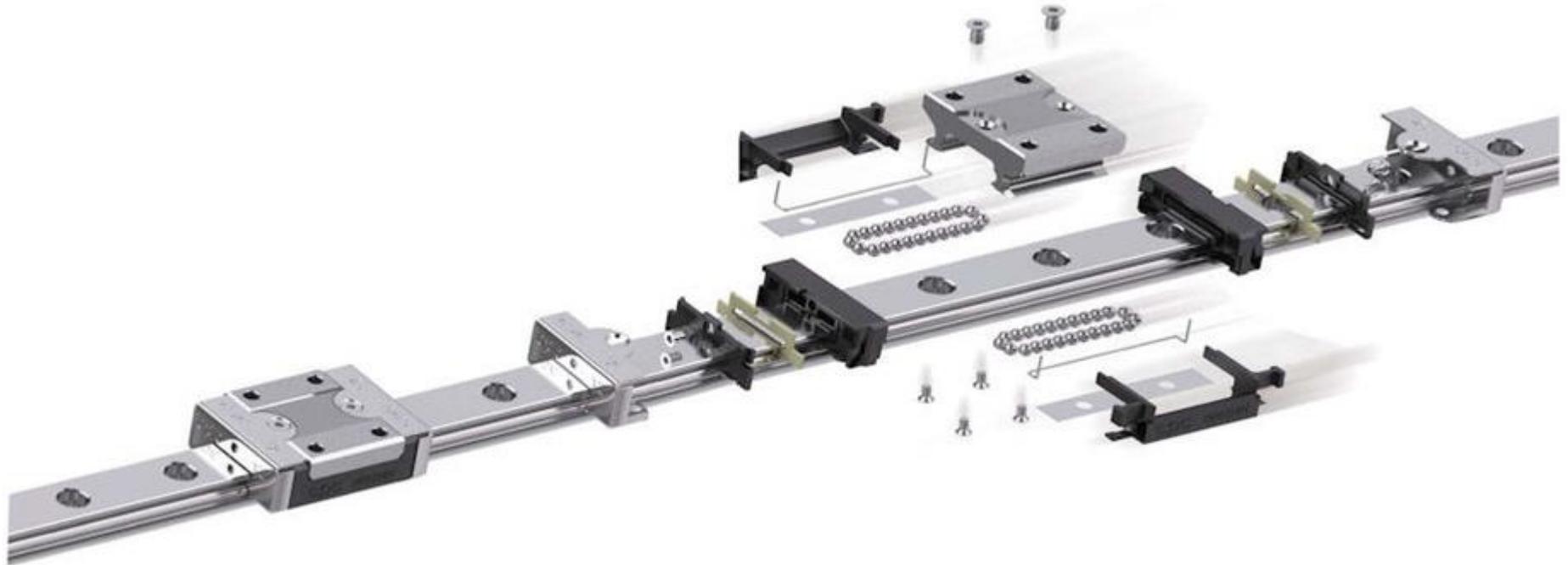
### Constituintes





## Guias de elementos rolantes

### Constituintes





## Guias de elementos rolantes

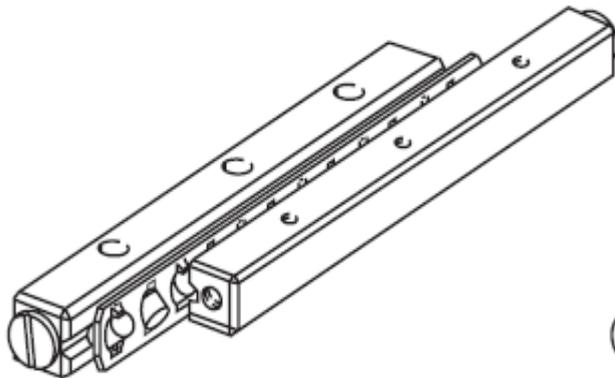
Vídeo – Frank Dynamic

Franke Dynamic  
Double rail with cassette

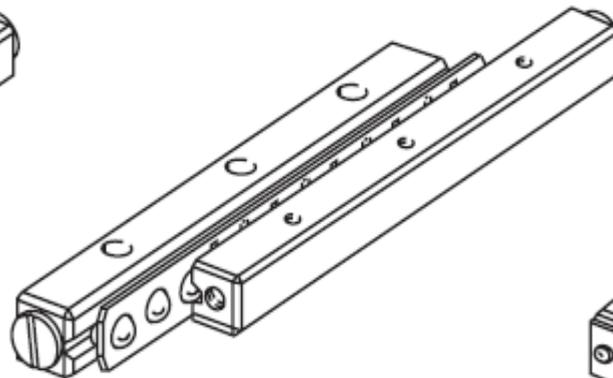


## Guias de elementos rolantes

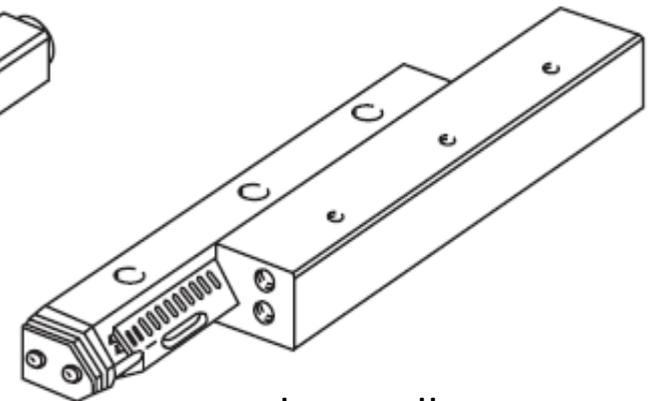
### Formas construtivas



rolos cruzados



esferas



rolos agulhas



## Guias de elementos rolantes

Vídeo – SKF

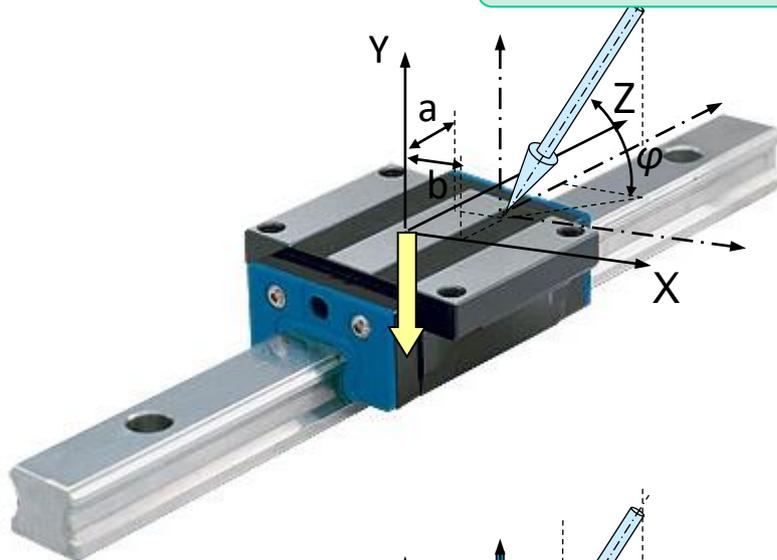


SKF Precision rail guides, LW range  
introduction and benefits

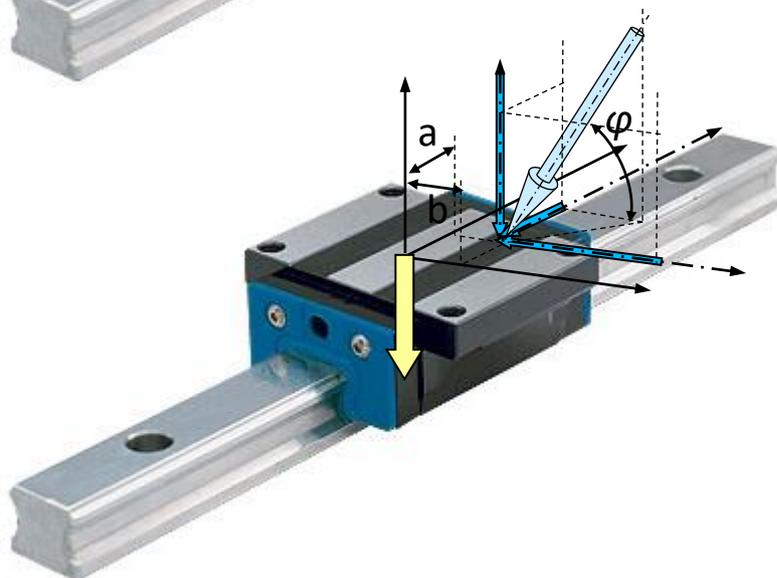


## Guias de elementos rolantes

### Dimensionamento



- Identifique a resultante das forças atuantes e sua direção

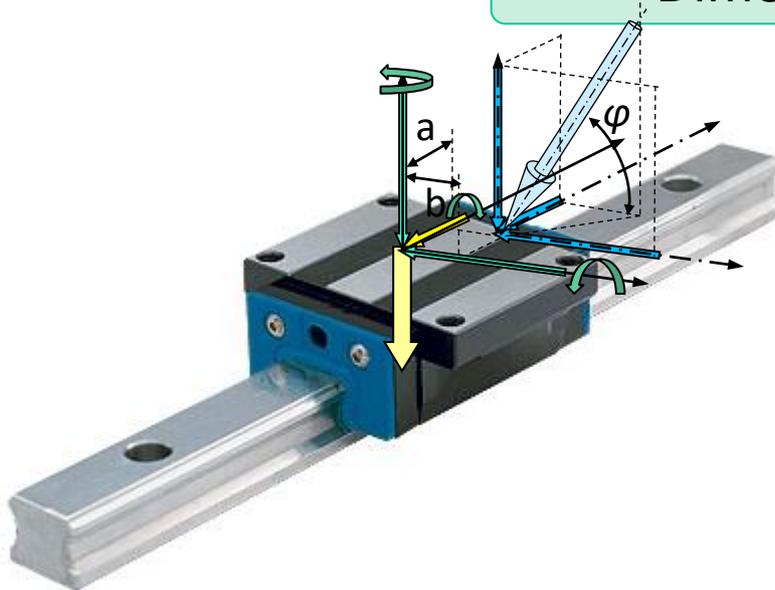


- Decomponha ortogonalmente a resultante das forças atuantes

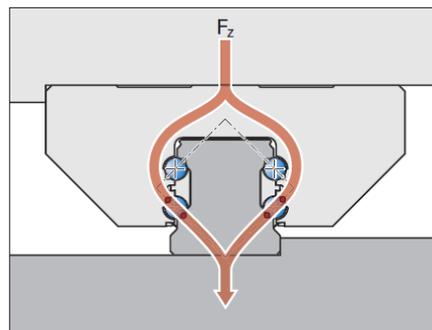


## Guias de elementos rolantes

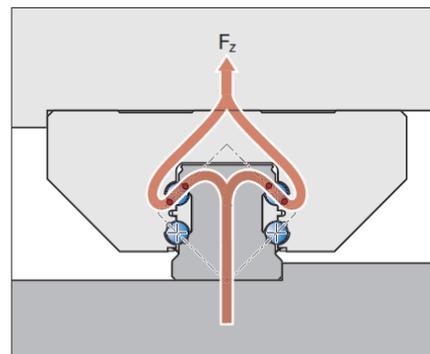
### Dimensionamento



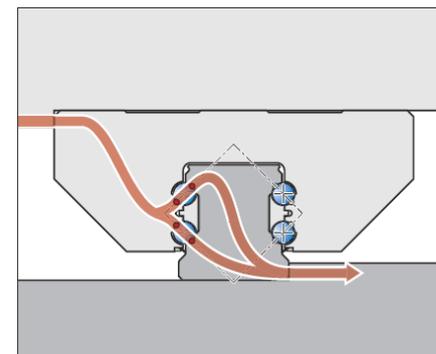
- Ao contrário das guias de escorregamento, guias de elementos rolantes dependem fortemente da configuração dos elementos rolante e da direção das forças



Force flow under a down load  $F_z$



Force flow under a lift-off load  $F_z$

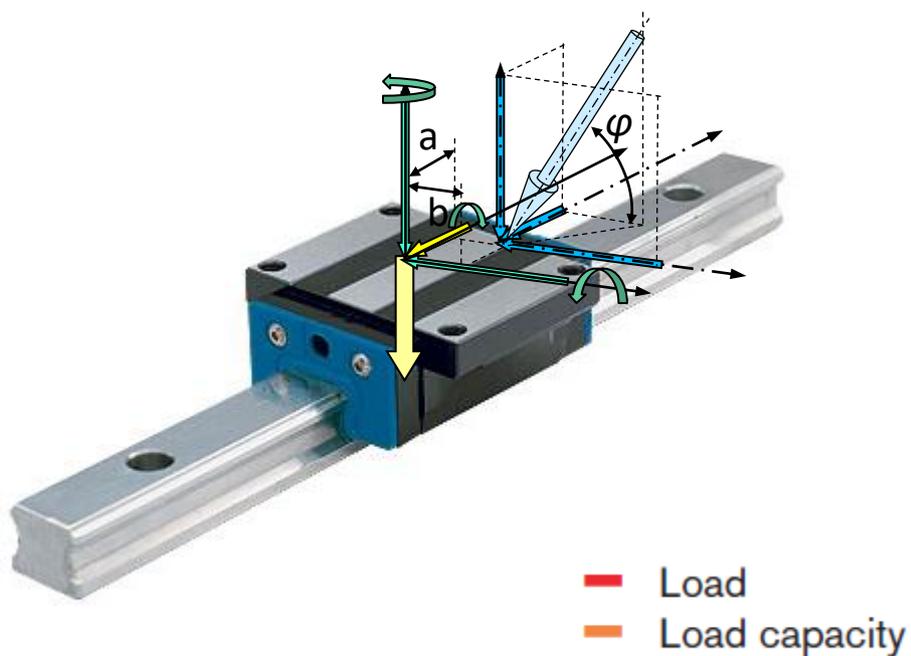


Force flow under a side load  $F_y$

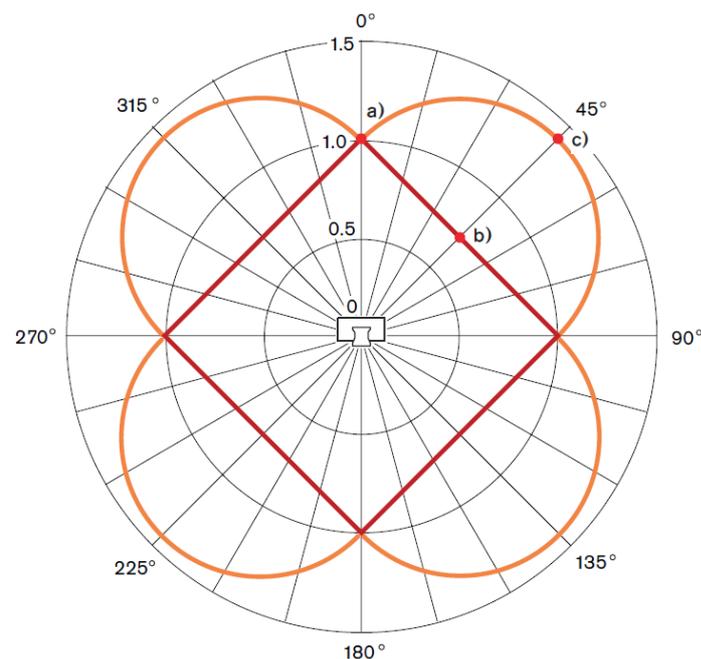


## Guias de elementos rolantes

### Dimensionamento



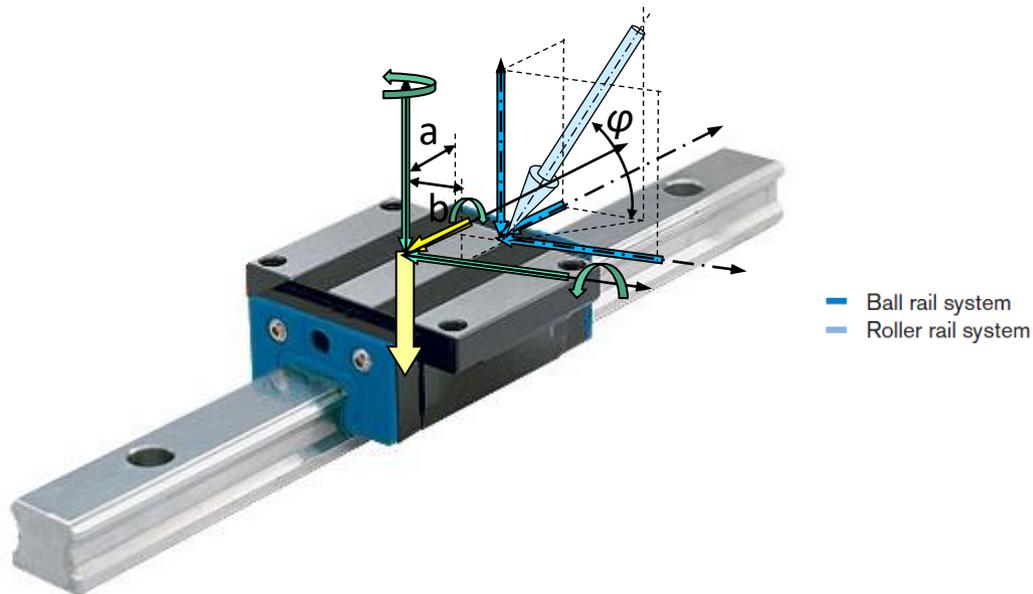
- Carregamento e capacidade de carga para mesma vida, sob diferentes direções de carregamentos



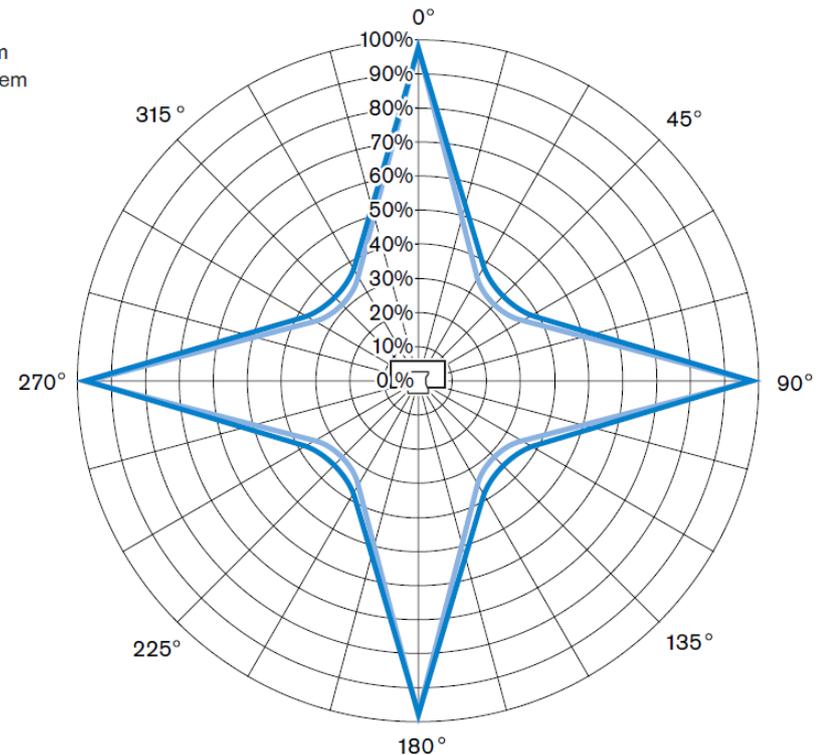


## Guias de elementos rolantes

### Dimensionamento



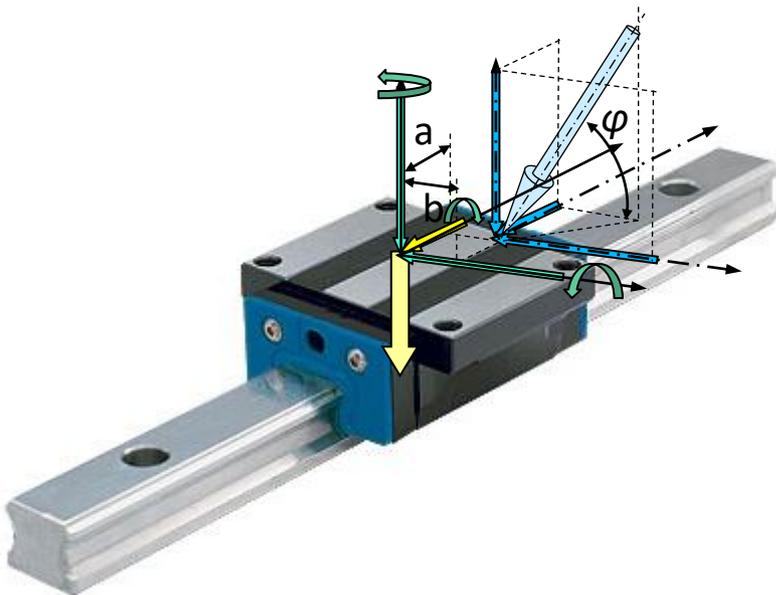
- Efeito da direções de carregamento sobre a vida





## Guias de elementos rolantes

### Dimensionamento



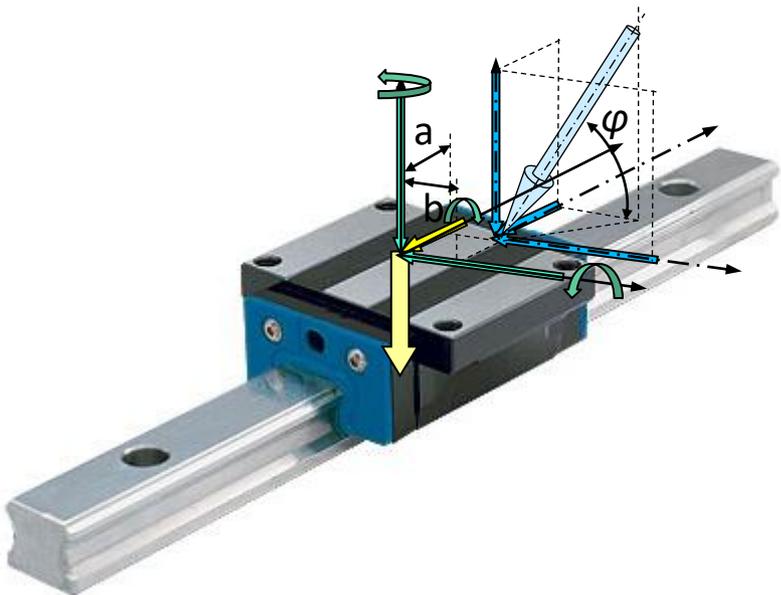
➤ Classes de pré carregamento

Preload class Code	Version	Preload class factor $X_{pr}$ (-)	Application area
C0	Without preload (with clearance)	0	For particularly smooth-running guide systems with the lowest possible friction and a minimum of external influences.
C1	Slight preload 0.02 C (2% of C) For roller rail systems (RRS): 0.03 C (3% of C)	0.02 0.03 (RRS)	For zero-clearance guide systems with low external loads and low requirements on overall rigidity.
C2	Medium preload 0.08 C (8% of C)	0.08	For precise guide systems with both high external loading and high demands on overall rigidity; also recommended for single-rail systems. Above-average moment loads can be absorbed without significant elastic deflection.
C3	High preload 0.13 C (13% of C)	0.13	For highly rigid guide systems such as required in precision machine tools or forming/molding machines. Above-average loads and moments can be absorbed with the least possible elastic deflection.



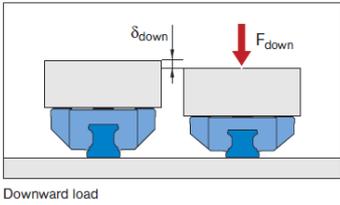
# Guias de elementos rolantes

## Dimensionamento



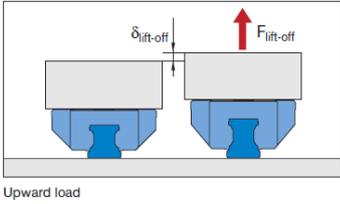
### ➤ Considerações sobre a deflexão

(3-5)  $c_{down} = \frac{F_{down}}{\delta_{down}}$

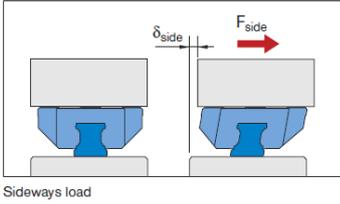


F = load resulting from a force (N)  
 δ = elastic deflection in the direction of loading (μm)  
 c = rigidity in the direction of loading (N/μm)

(3-6)  $c_{lift-off} = \frac{F_{lift-off}}{\delta_{lift-off}}$



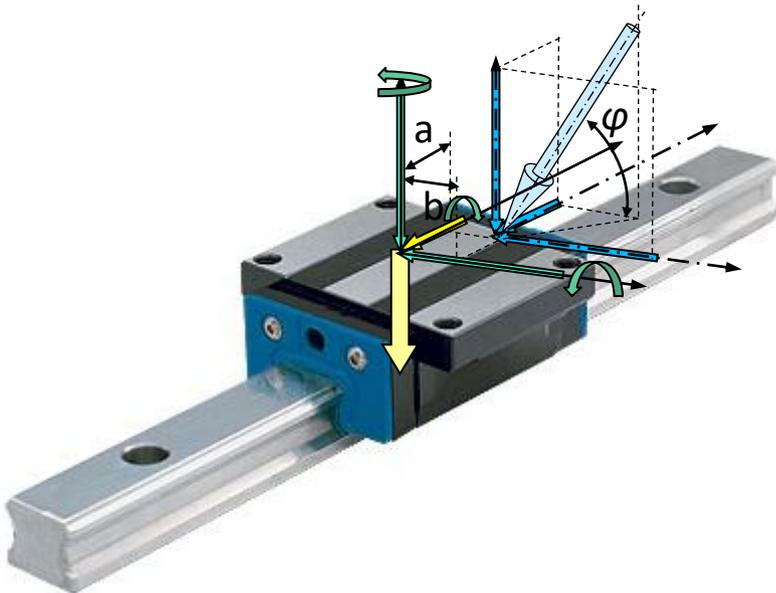
(3-7)  $c_{side} = \frac{F_{side}}{\delta_{side}}$



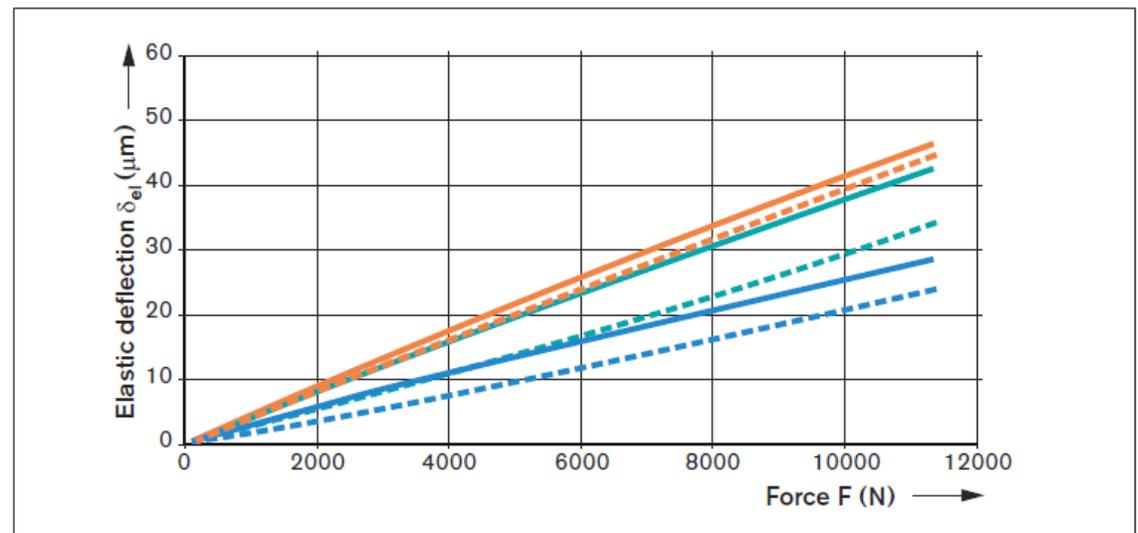


## Guias de elementos rolantes

### Dimensionamento

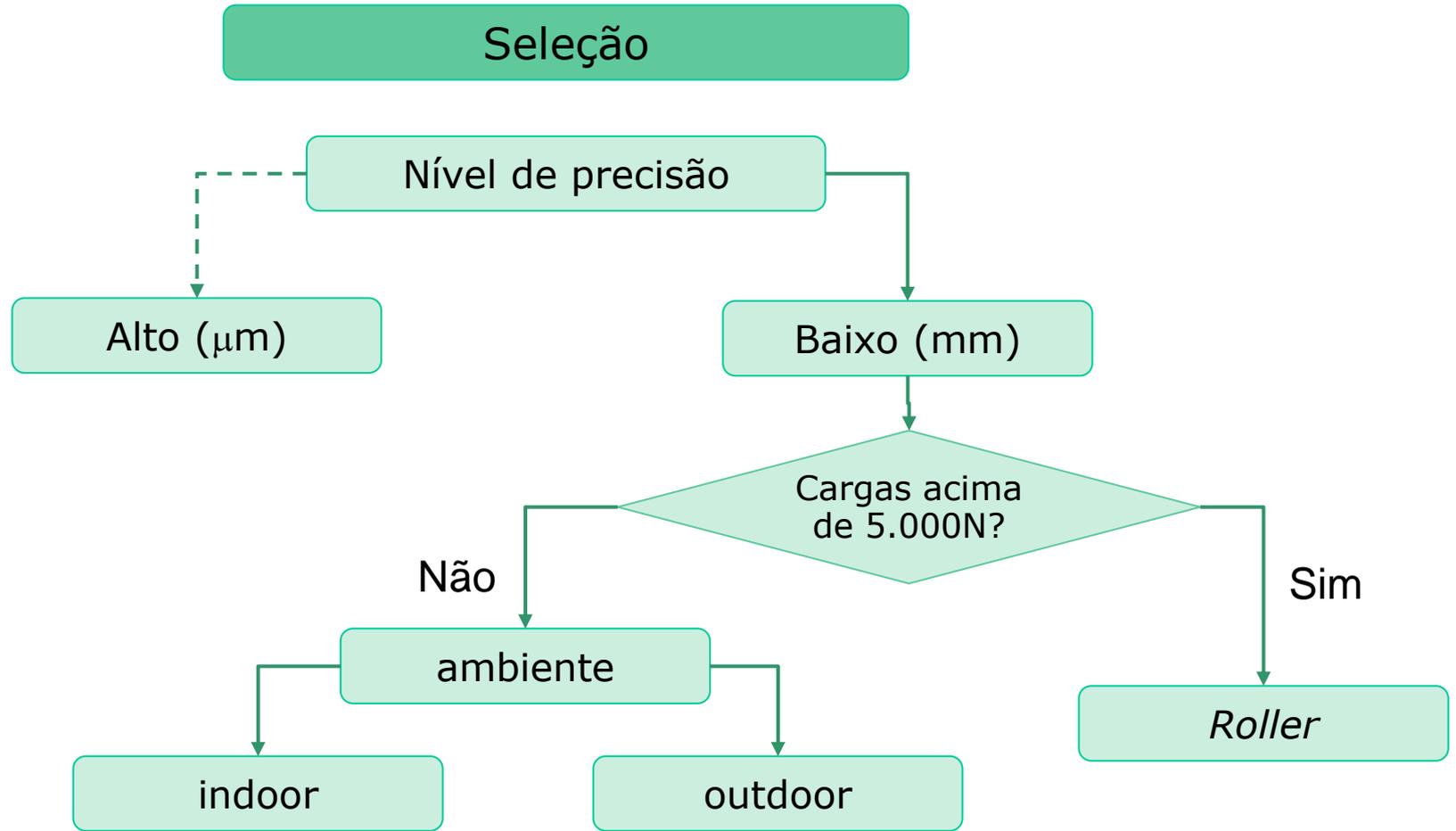


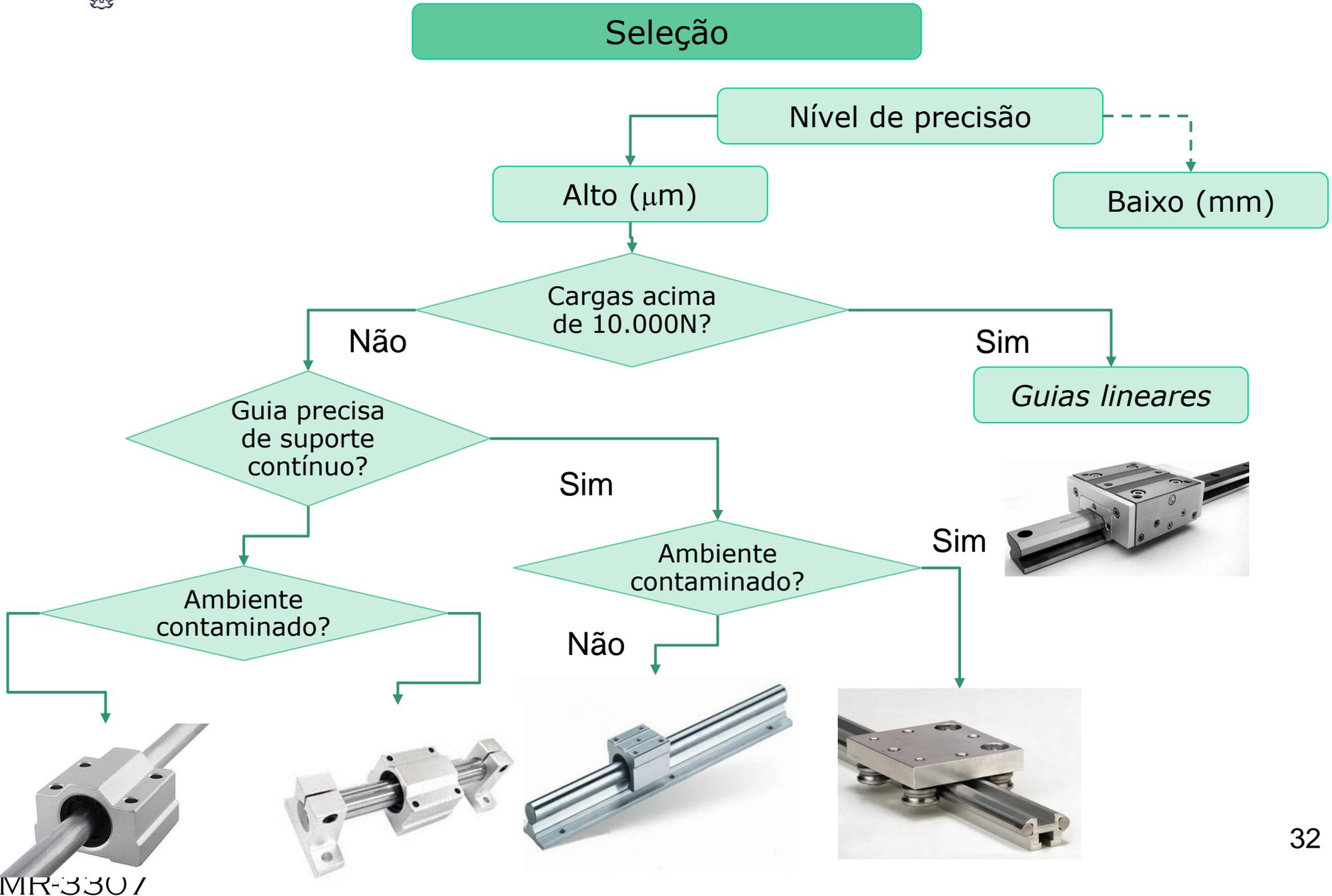
➤ Considerações sobre a deflexão



— C1, down load  
— C1, lift-off load  
— C1, side load

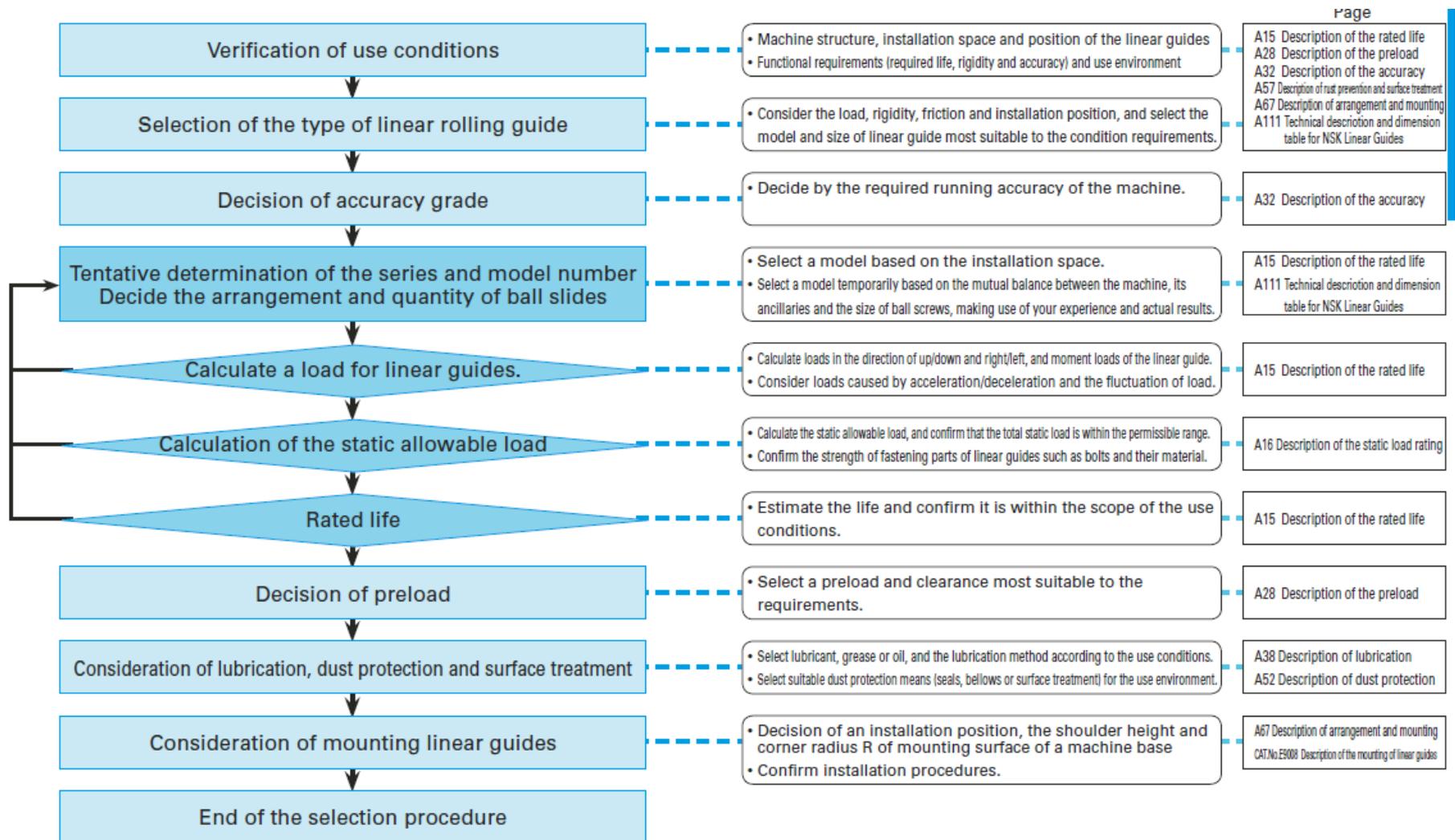
— C2, down load  
— C2, lift-off load  
— C2, side load







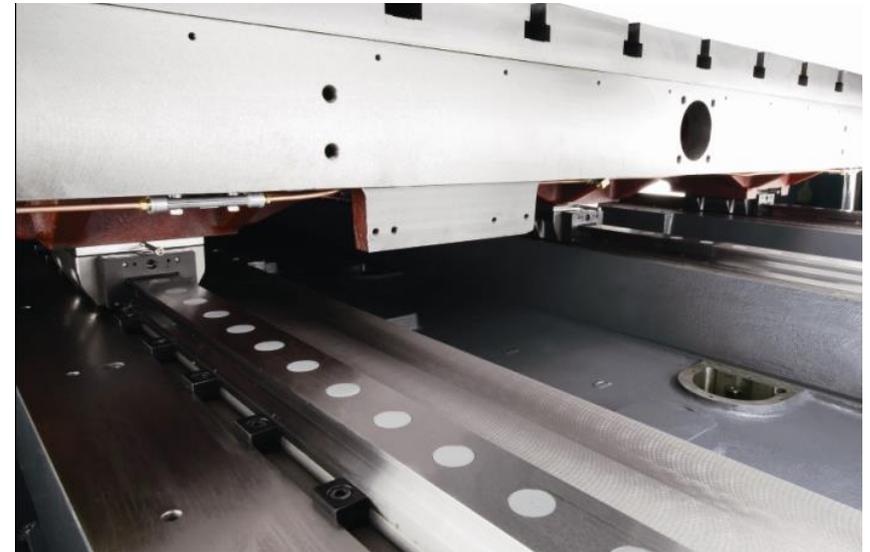
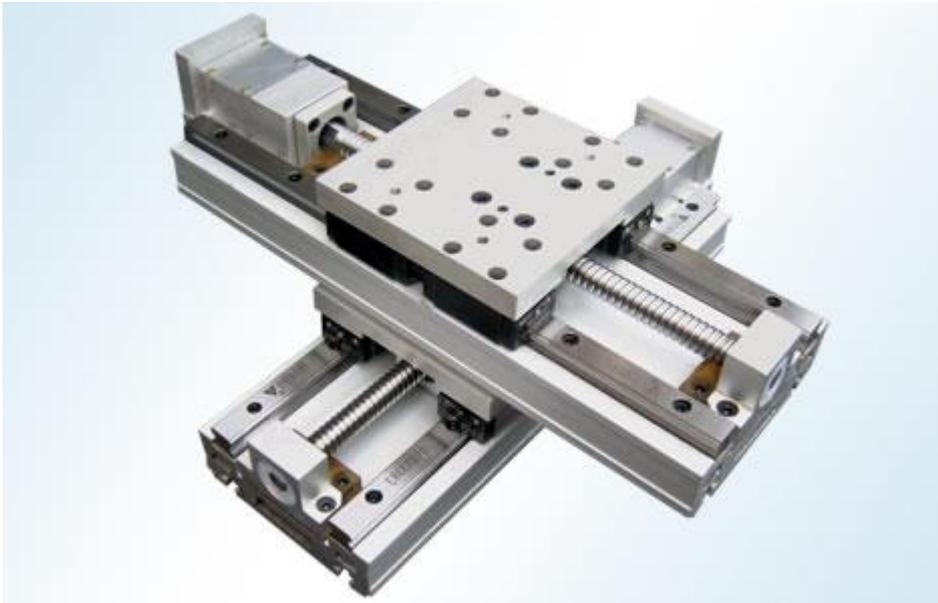
## Seleção - NSK





## Guias de elementos rolantes

### Exemplos





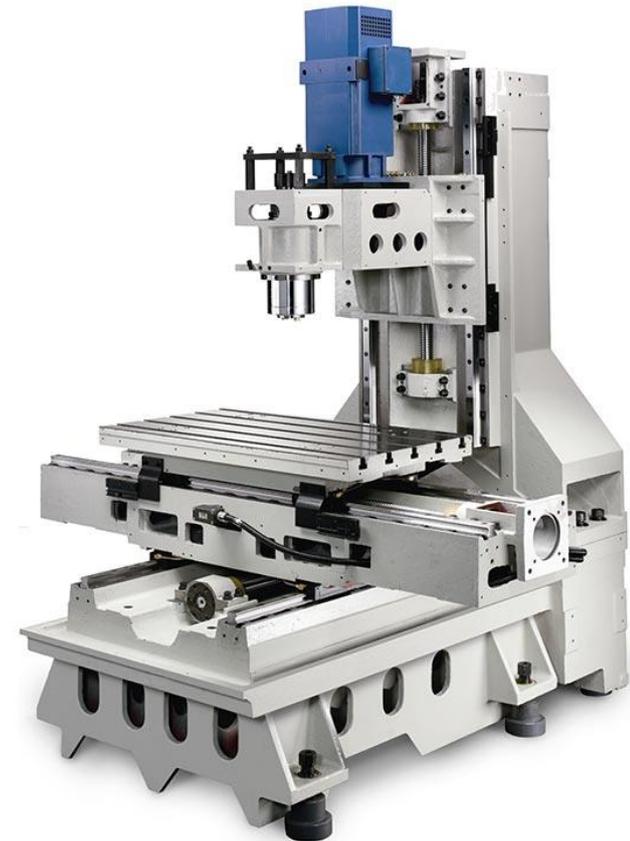
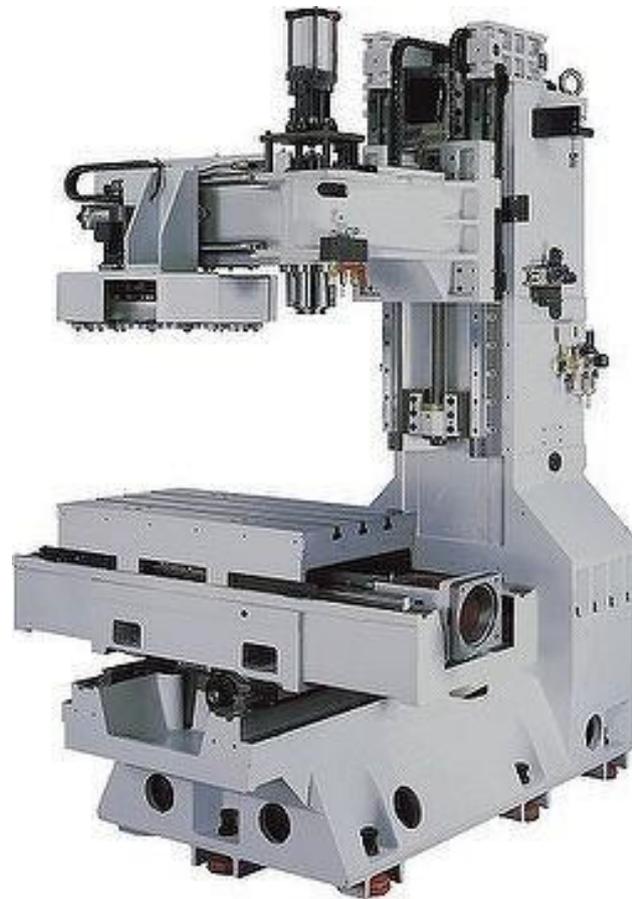
Classification	Application	Accuracy grade					Preload				
		Ultra precision P3	Super precision P4	High precision P5	Precision P6	Normal PN, PC	Heavy preload Z4	Medium preload Z3	Light preload Z2	Slight preload Z1, Z2	Fine clearance Z0, ZT
Machine tools	Machining center		✓	✓	✓		✓	✓			
	Grinding machine	✓	✓	✓			✓	✓	✓		
	Lathe		✓	✓	✓		✓	✓			
	Milling machine		✓	✓	✓		✓	✓			
	Drilling machine			✓	✓		✓	✓			
	Boring machine		✓	✓	✓		✓	✓			
	Gear cutting machine		✓	✓	✓		✓	✓	✓		
	Die sinking machine		✓	✓	✓			✓	✓	✓	
	Laser beam machine		✓	✓	✓			✓	✓	✓	
	Electric discharge machine	✓	✓	✓			✓	✓			
Semiconductor processing	Wafer prober	✓						✓		✓	
	Wire bonding machine		✓	✓				✓	✓	✓	
	PCB drilling machine			✓	✓			✓	✓	✓	
	Wafer slicing machine	✓	✓						✓		
	Wafer dicing machine	✓	✓						✓		
	Chip mounter			✓	✓			✓	✓	✓	
	IC handler			✓	✓					✓	
	Scanning machine			✓	✓					✓	
	Lithographic machine	✓	✓					✓	✓	✓	
Others	Measuring/inspection apparatus	✓	✓	✓	✓					✓	
	3D measuring equipment	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	
	Medical apparatus		✓	✓	✓					✓	✓
	OA equipment				✓	✓				✓	✓
	Railway cars					✓				✓	✓
	Stage systems					✓					✓
	Pneumatic equipment				✓	✓				✓	✓



## Guias de elementos rolantes

Vídeo instalação - NSK

MOTION & CONTROL™  
**NSK**

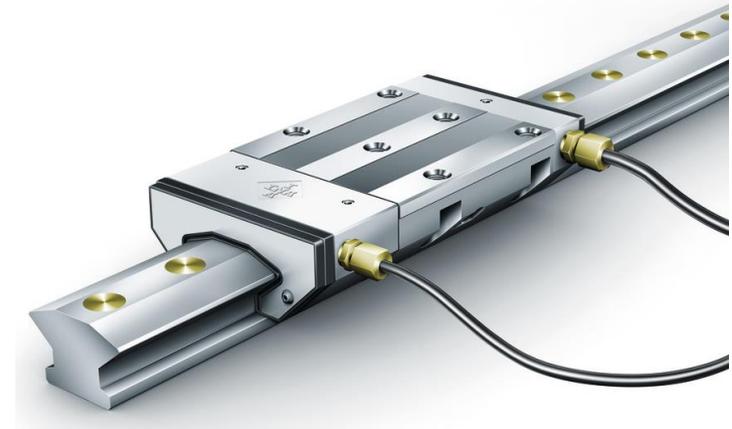




## Guias

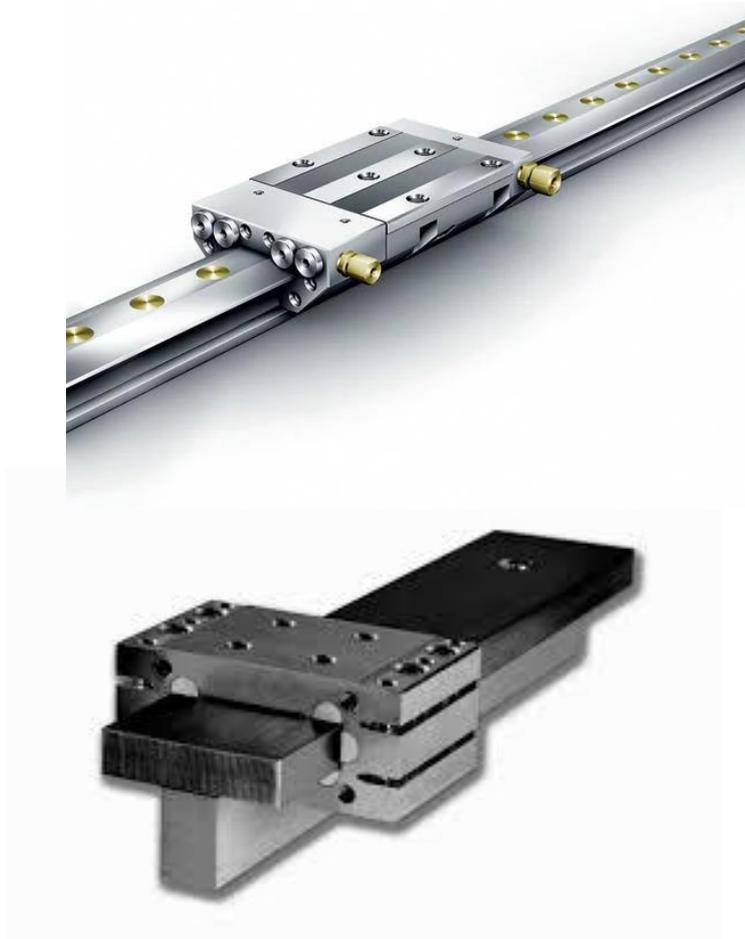
de elementos rolantes

hidrostáticas





## Guias Hidrostáticas



- **Guias** hidrostáticas são elementos de máquinas onde a separação das partes com movimento relativo, e a absorção dos carregamentos é resultado de um filme de óleo (ou outro líquido) cuja a pressão é fornecida por uma bomba externa.



## Guias Hidrostáticas

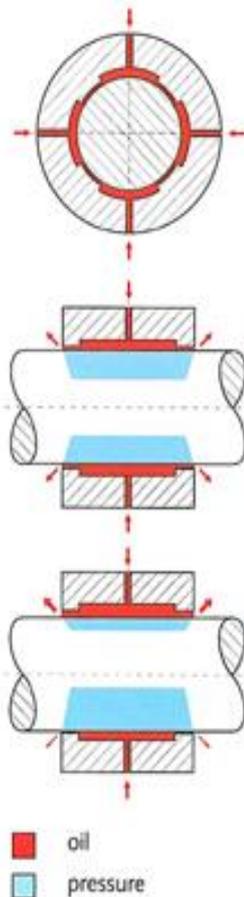
### Características

The principle of the hydrostatic bearing

Cross section of hydrostatic bearing

Longitudinal section of hydrostatic bearing

Longitudinal section showing reaction to displacement



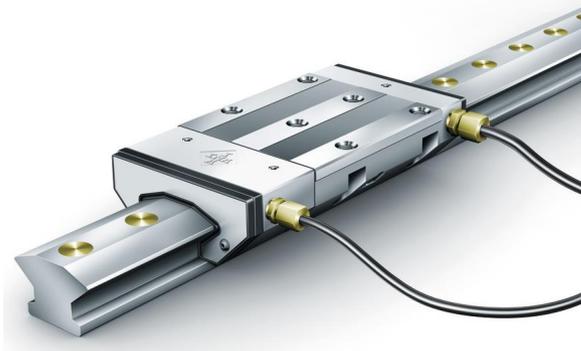
- Projeto complexo
- Fabricação complexa
- Baixa modularidade
- Sem atrito, desgaste e stick-slip
- Elevada capacidade de carga
- Sistemas de retorno e resfriamento
- Alta rigidez
- Elevado amortecimento
- Alta velocidade
- Problema de estabilidade térmica
- Elevada exatidão



## Guias Hidrostáticas

Guias

hidrostáticas



### Vantagens

- Movimento de cargas pesadas
- Movimentação suave
- Movimento preciso
- Controláveis

### Desvantagens

- Projeto complexo
- Fabricação
- Equipamento de retorno
- Geração de calor
- Equipamento de resfriamento
- Contaminação



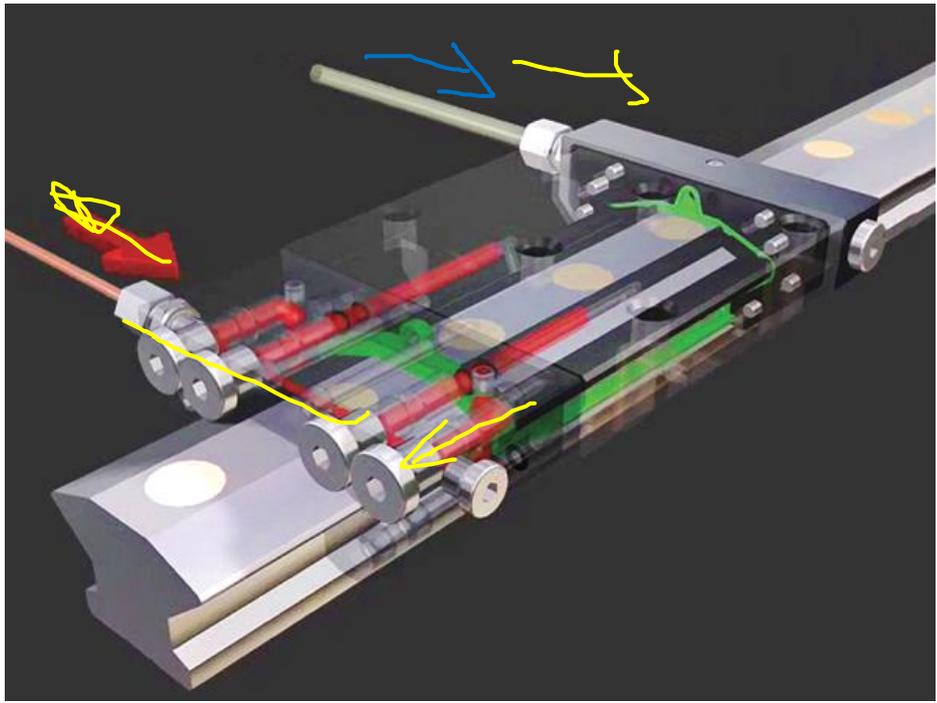
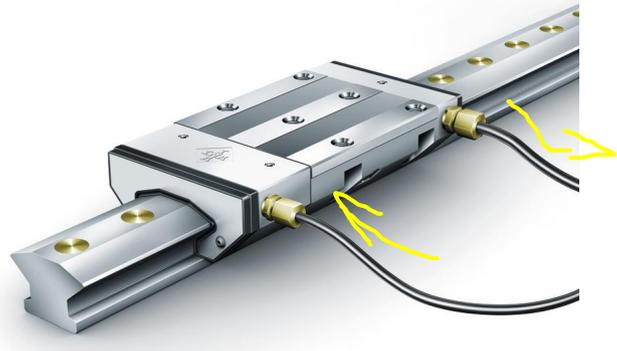
## Guias Hidrostáticas

Guias



hidrostáticas

➤ Equipamento de retorno

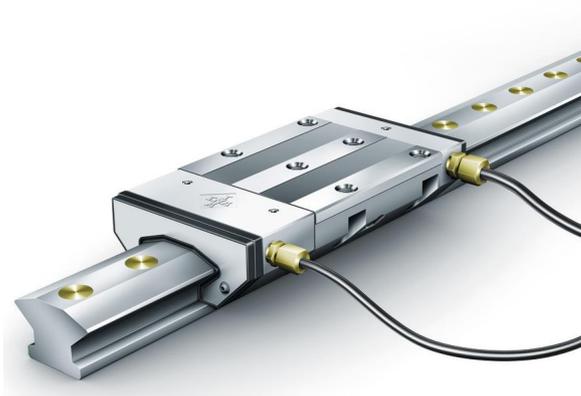




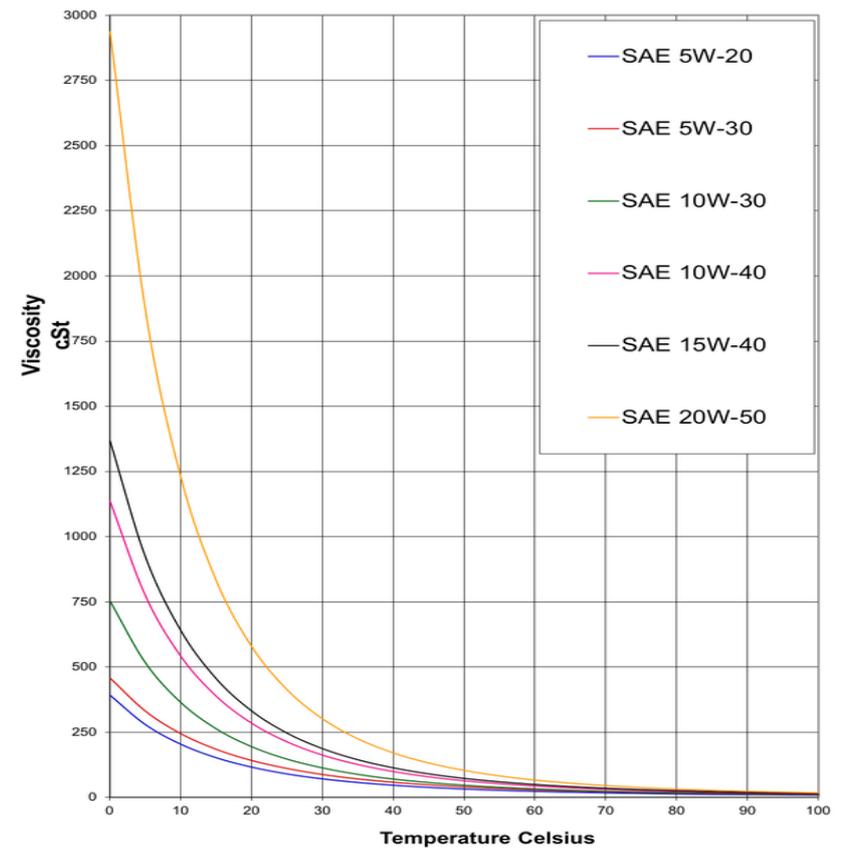
## Guias Hidrostáticas

Guias

hidrostáticas



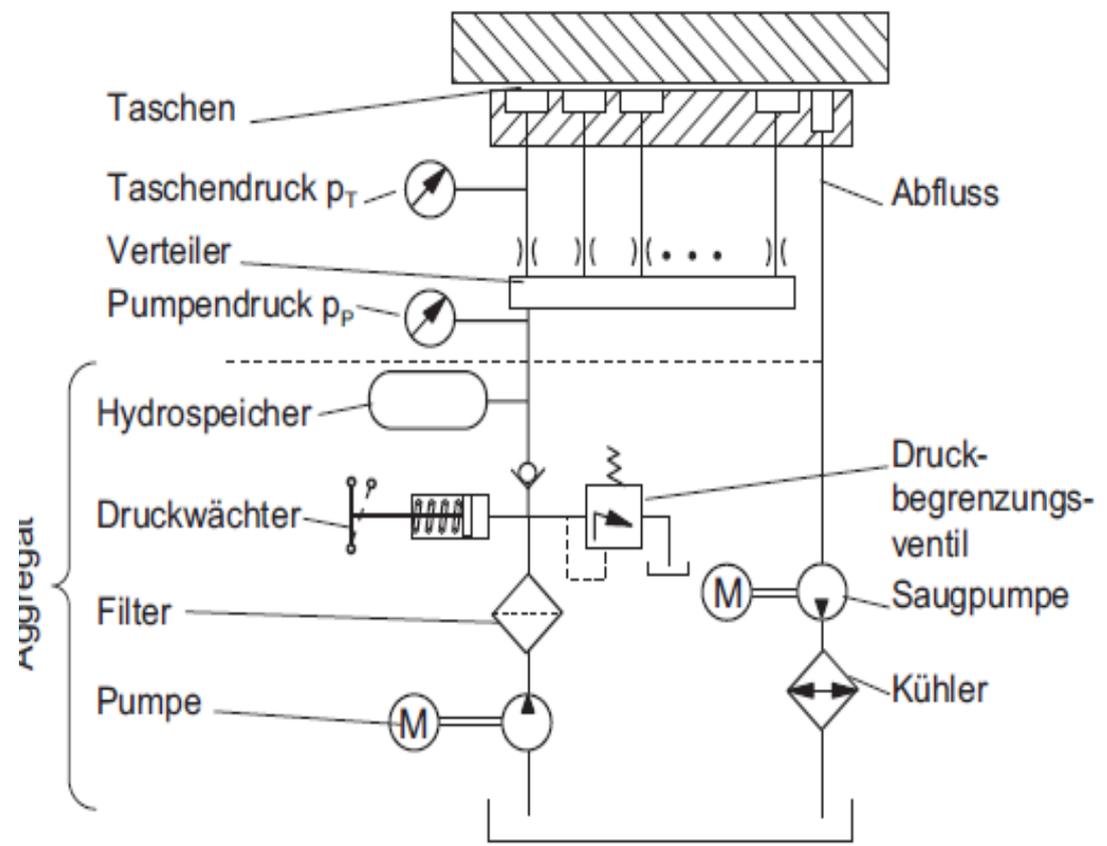
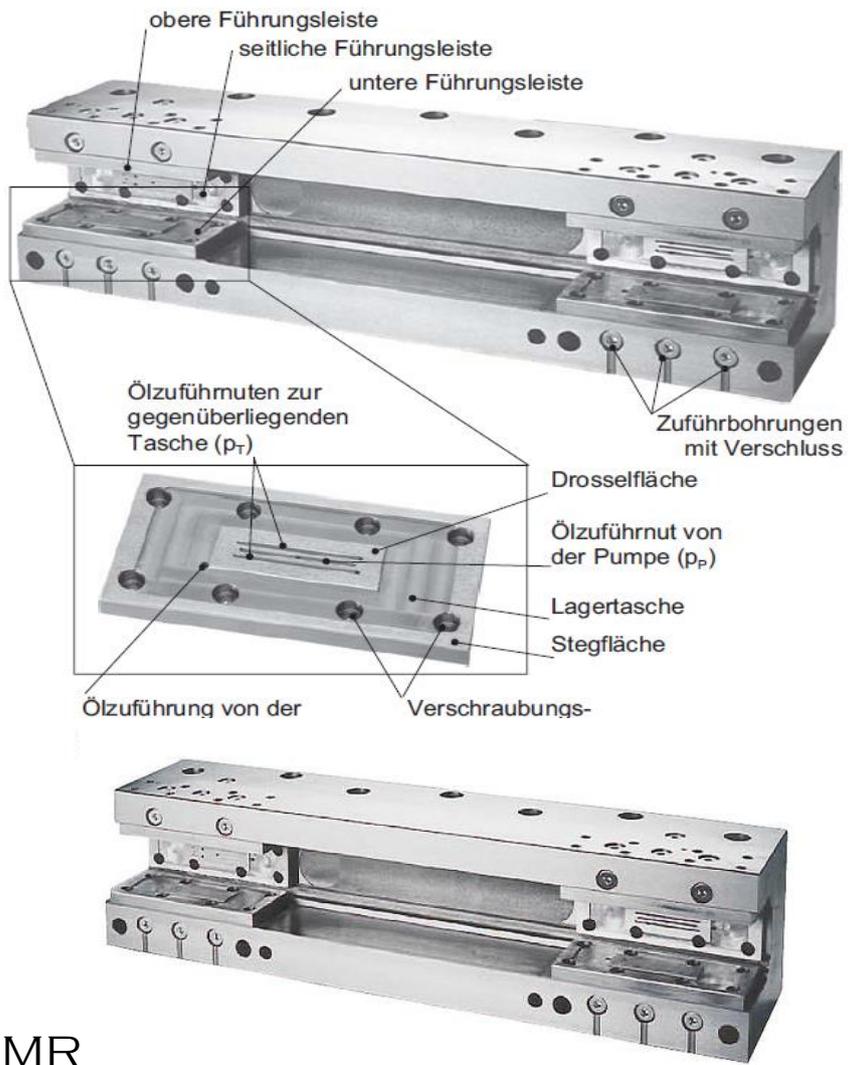
➤ Equipamento de resfriamento





# Guias Hidrostáticas

## Constituintes



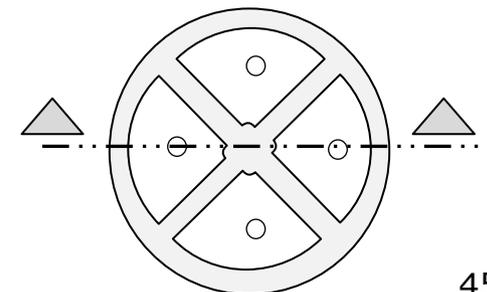
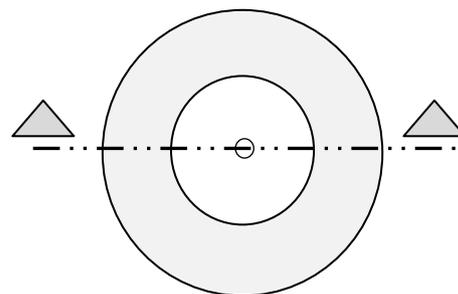
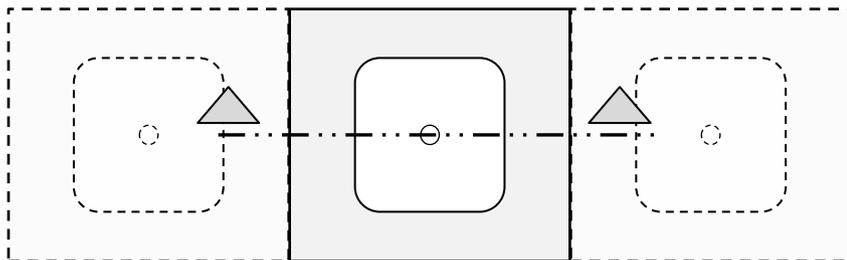
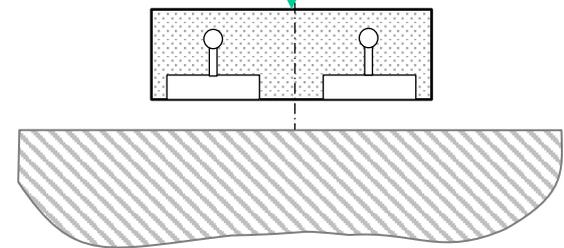
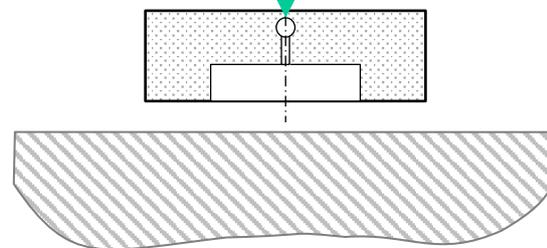
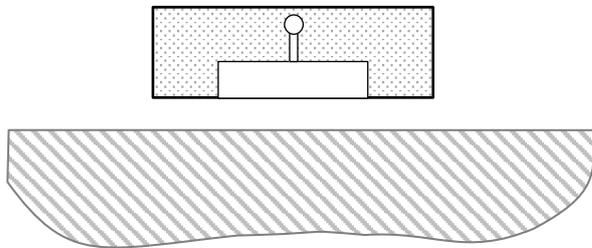


## Guias hidrostáticas

*Pads / Sapatas*

Retangulares

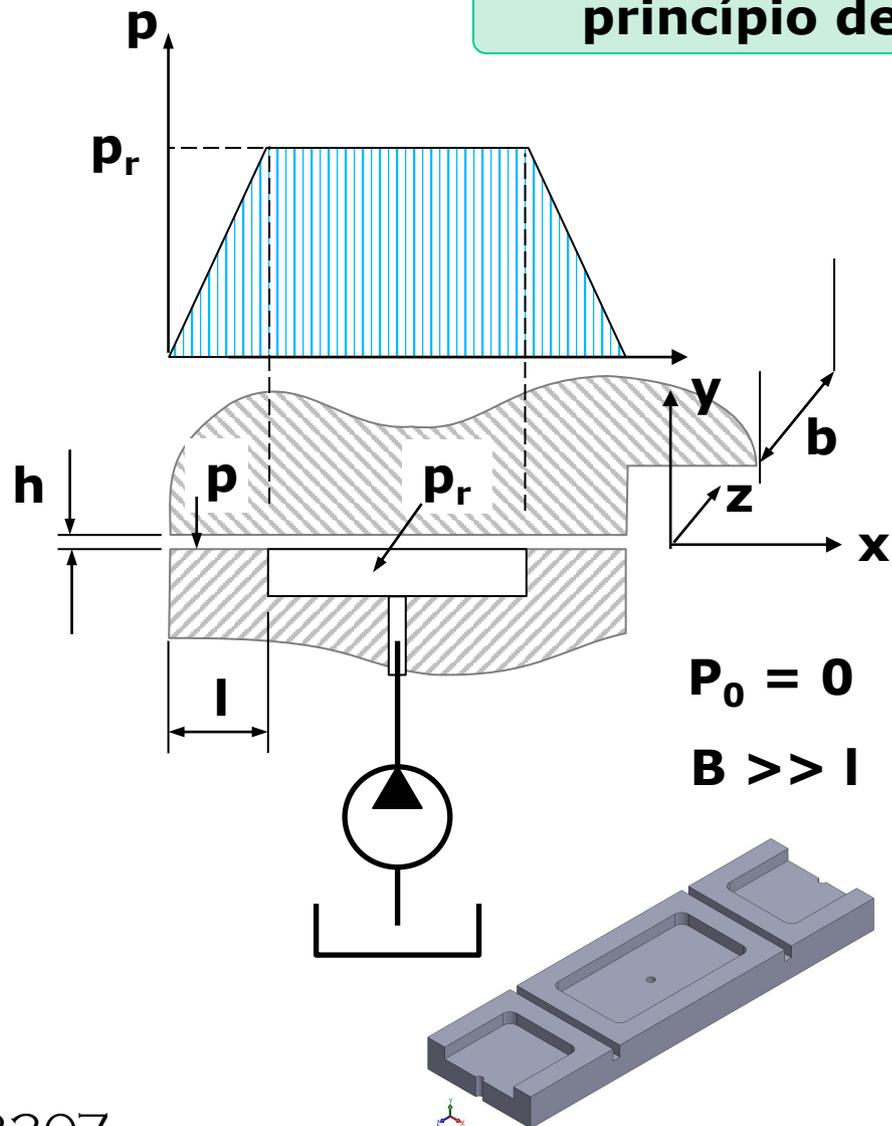
Circulares





## Guias Hidrostáticas

### princípio de funcionamento



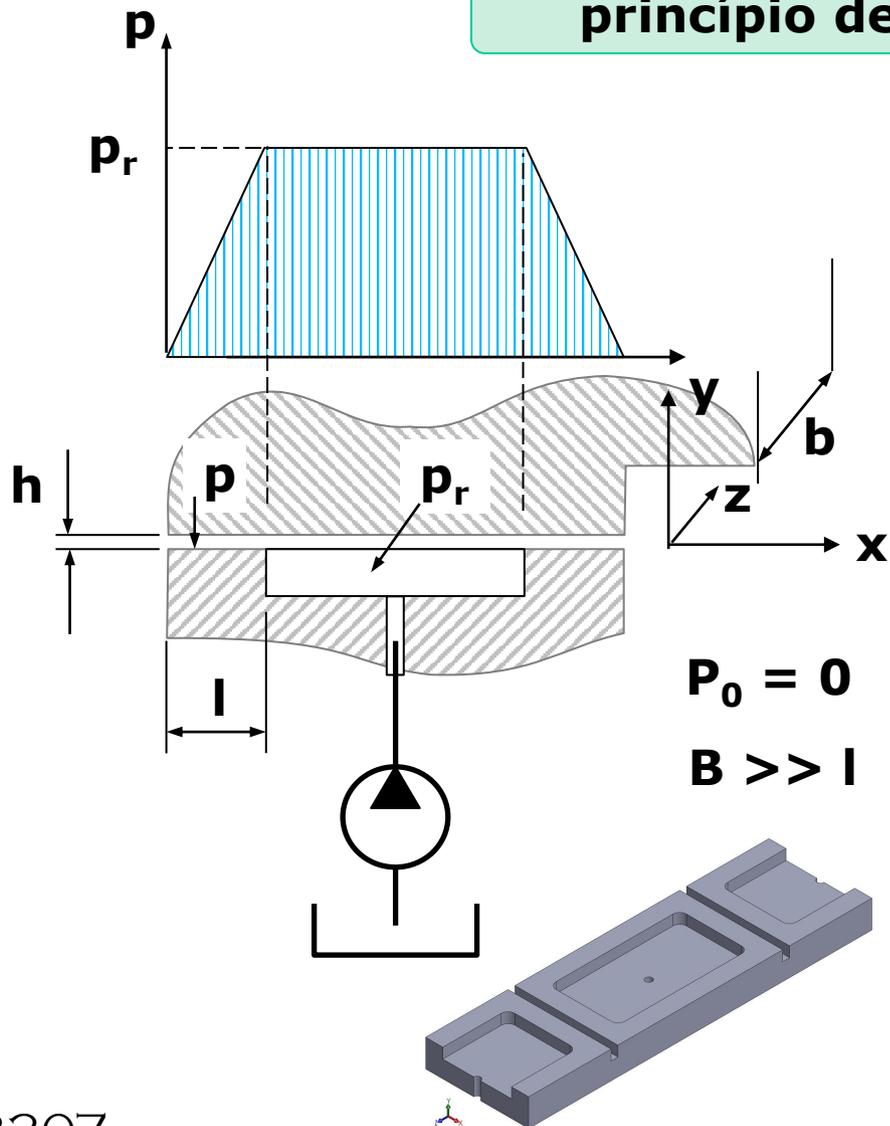
### Assumindo:

- 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).



## Guias Hidrostáticas

### princípio de funcionamento



### Assumindo:

- Nenhum fluxo ocorre perpendicular ao plano YX, não há fluxo interno na direção Z. Temos:

$$(\tau + d\tau) dx - \tau dy - (p + dp) dy = 0$$

e

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dz}$$

Então:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

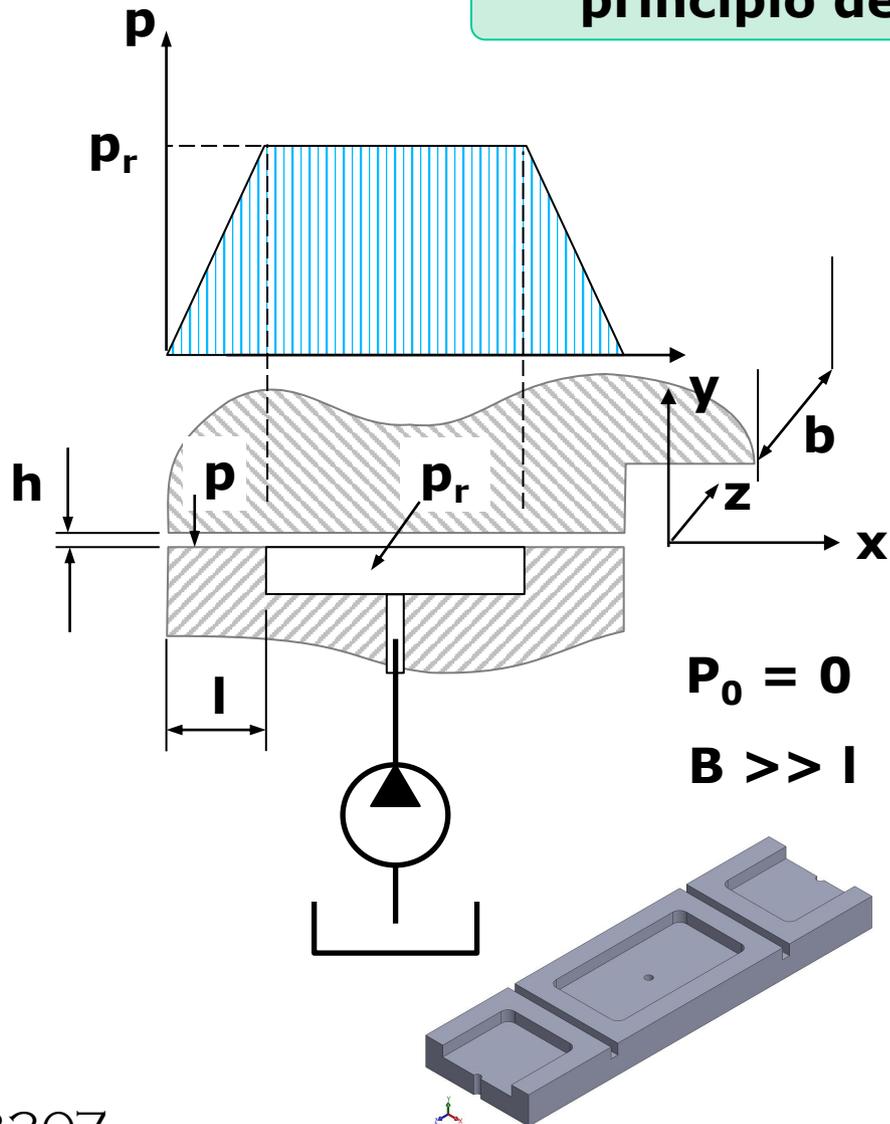
$\eta = \text{viscosidade dinâmica}$

$$\eta_{\text{óleo}} = 28000 \text{ e} - 6 \text{ Pa.s}$$



## Guias Hidrostáticas

### princípio de funcionamento



$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

$\eta =$  viscosidade dinâmica

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

$$\frac{dp}{dx} = \eta \frac{d^2v}{dy^2}$$

Como:  $\frac{dp}{dy} = -J = \text{constante}$

$$J = \frac{P_2 - P_1}{l}$$

$$\eta_{\text{óleo}} = 28000 \text{ e} - 6 \text{ Pa.s}$$

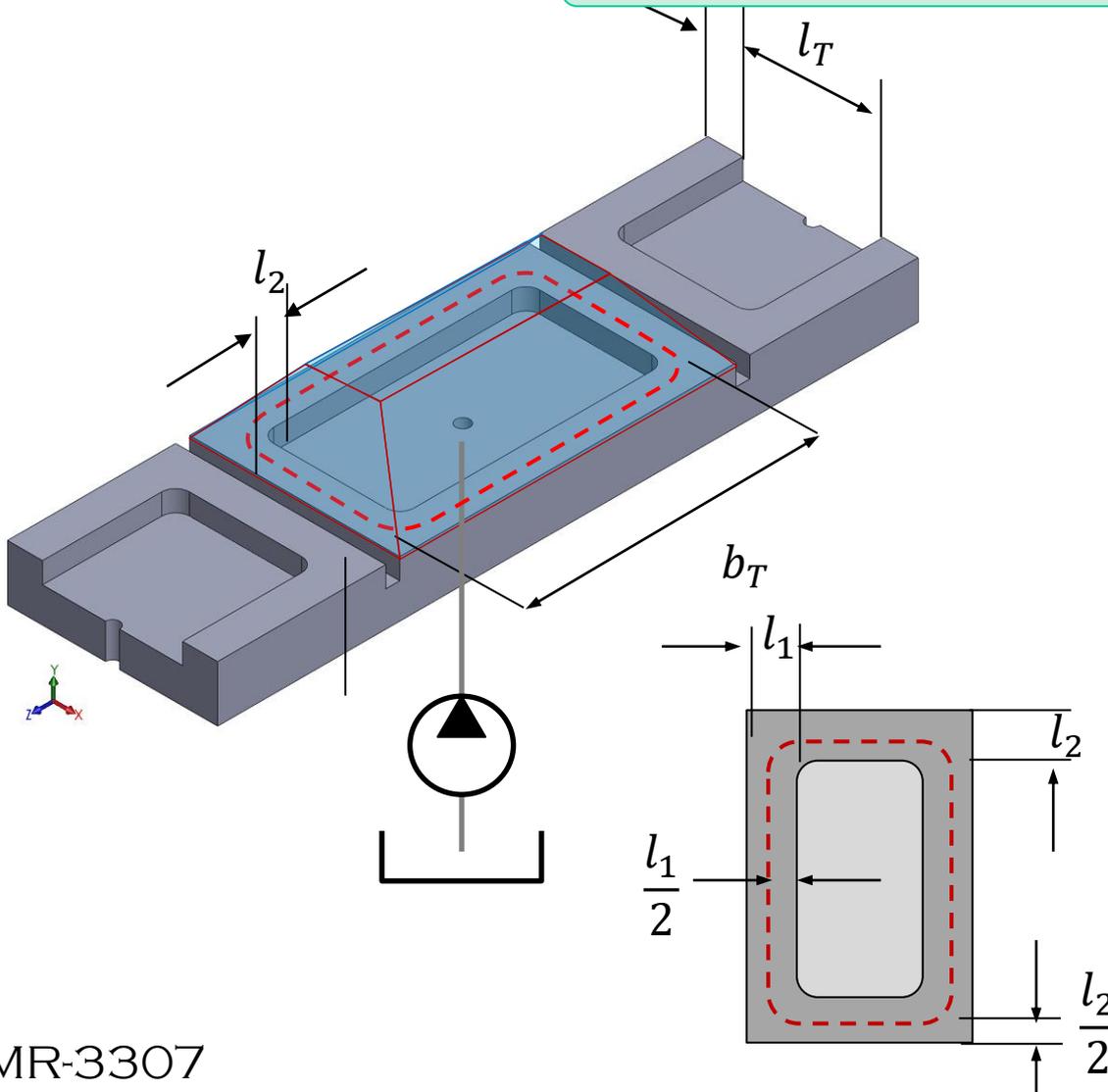
$$\text{➤ } Q = \frac{bh^3}{12\eta l} \Delta p$$

$$\text{➤ } W = \frac{P_2 - P_1}{l} Q$$



## Guias Hidrostáticas

### princípio de funcionamento



$Q = \text{Vazão de óleo}$

$$Q = \frac{bh^3}{12\eta l} (p_2 - p_1)$$

➤ Como  $p_1 = p_r$ , e  $p_2 = 0$  temos:

$$Q = \frac{bh^3}{12\eta l} (p_r)$$

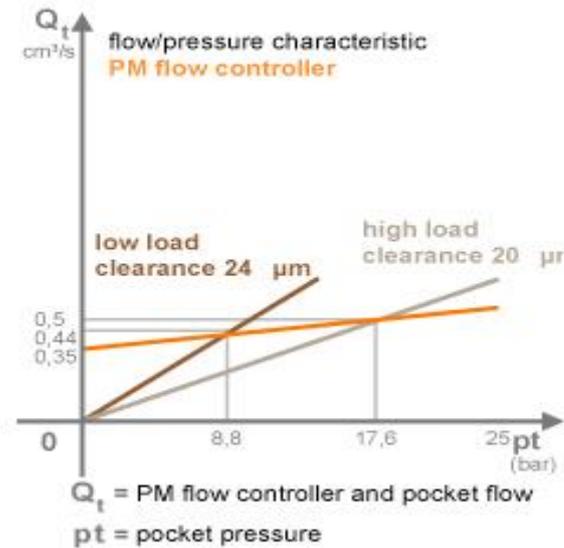
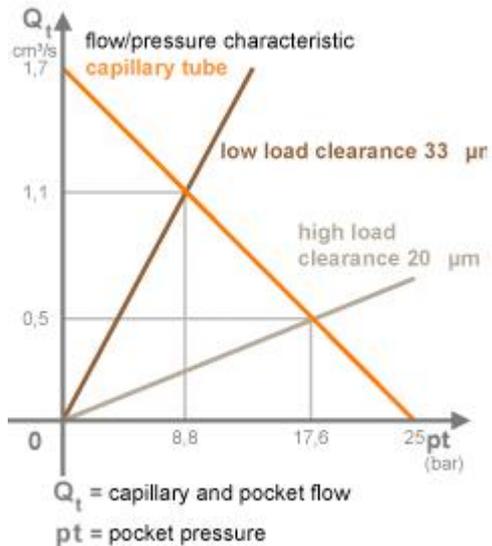
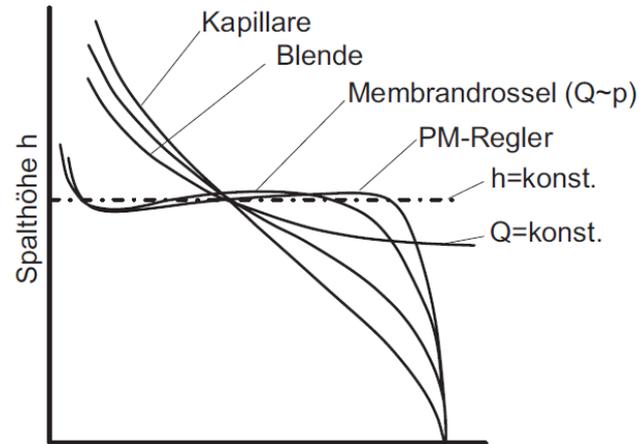
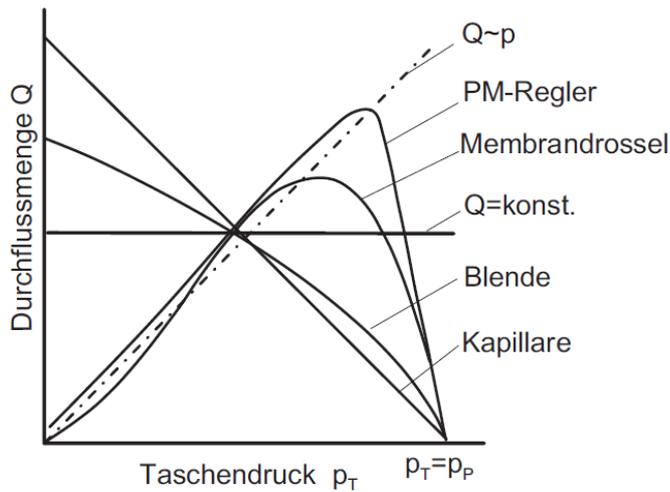
$W = \text{Capacidade de Carga}$

$$W = \frac{12 Q \eta l A_{eff}}{b h^3}$$



# Guias Hidrostáticas

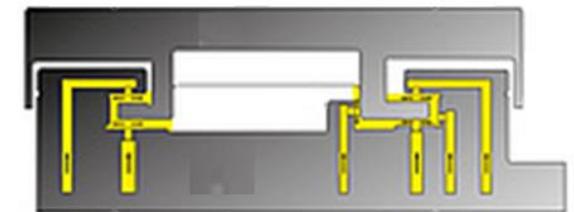
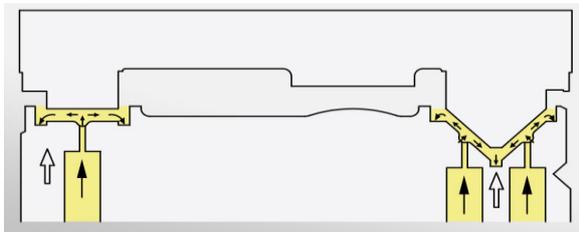
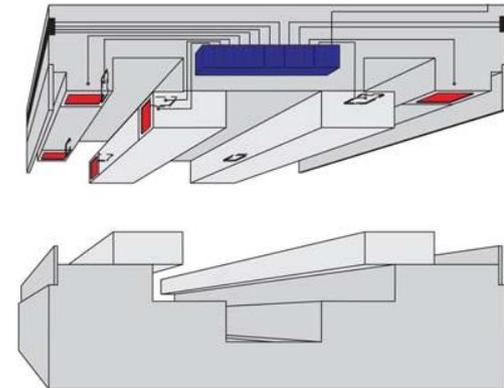
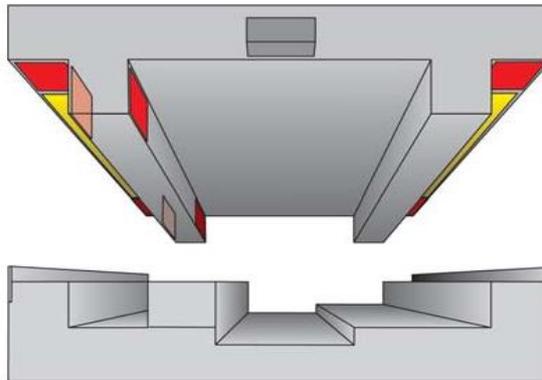
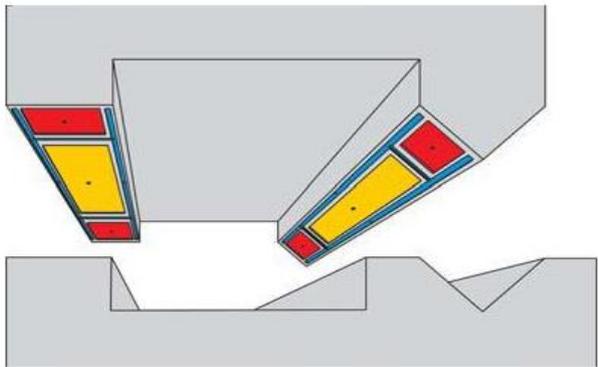
## Efeito do tipo de restritor de fluxo





## Guias Hidrostáticas

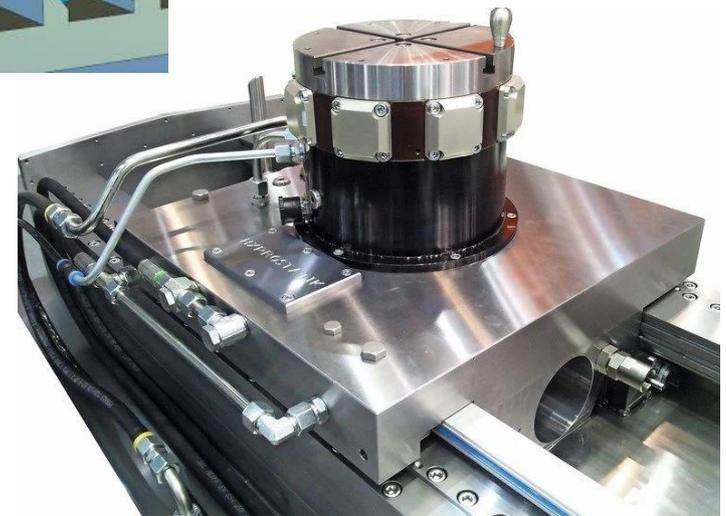
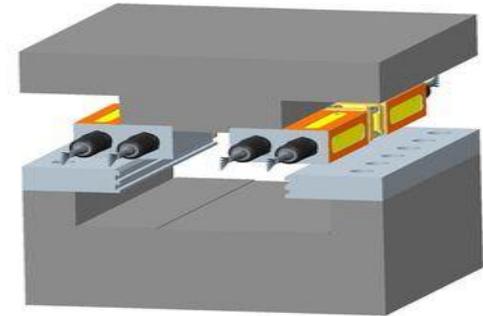
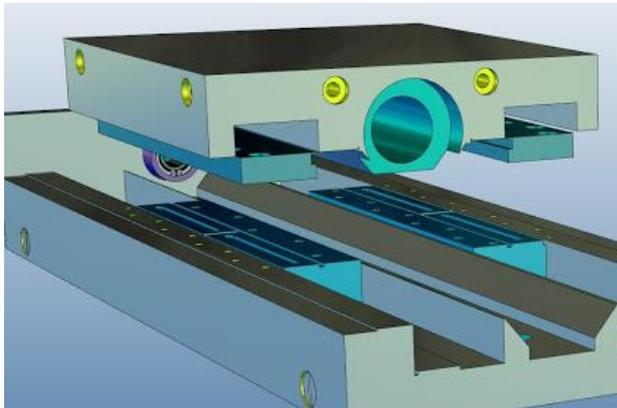
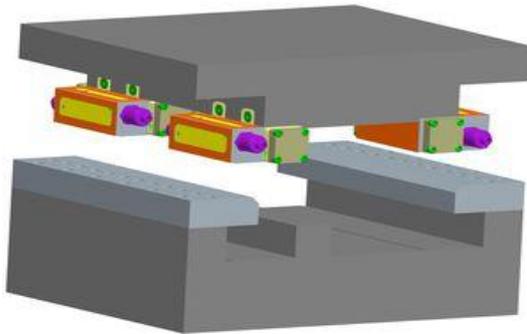
### Tipos construtivos





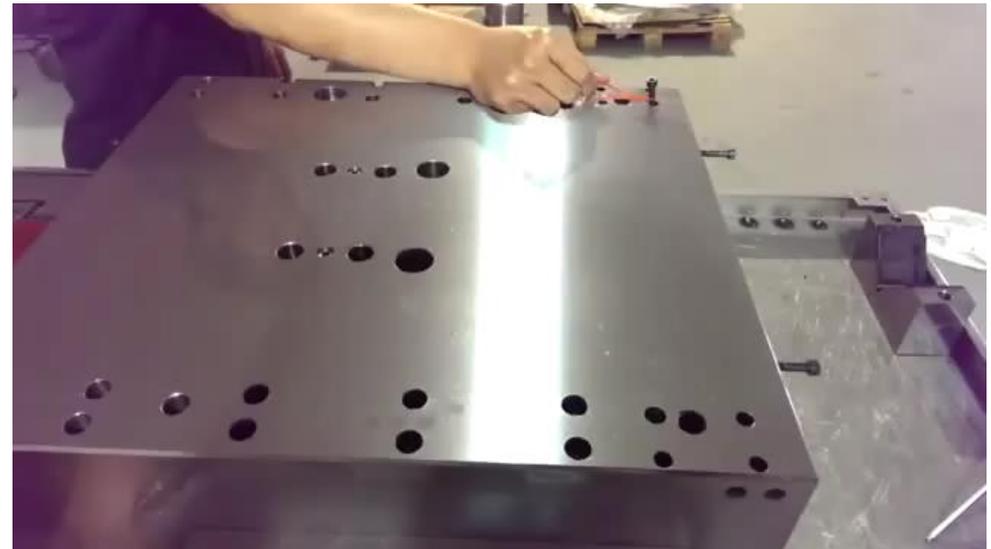
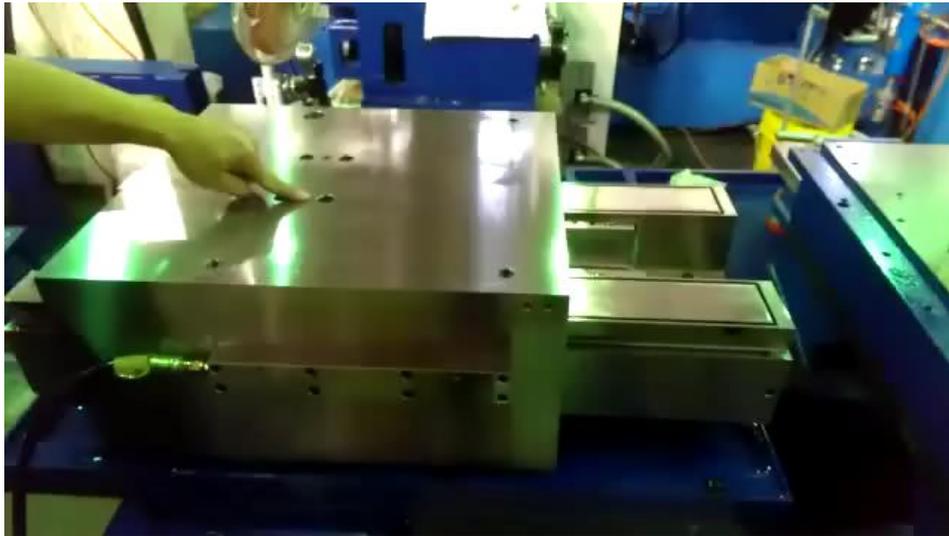
## Guias Hidrostáticas

### Tipos construtivos





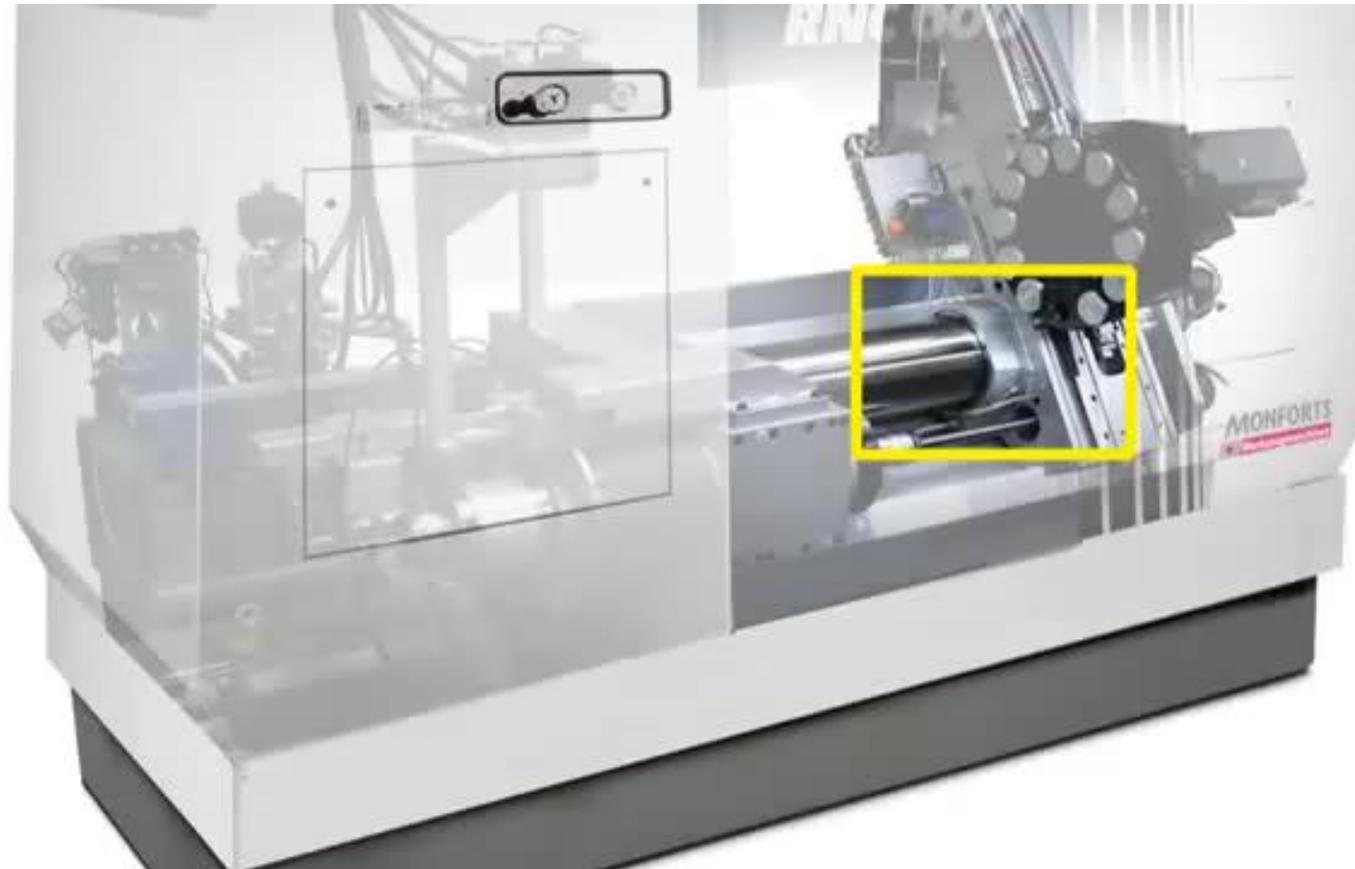
*Weibo Hydrostatic Guideway*



<https://www.youtube.com/watch?v=15bis0Z6cEc>



*Monforts Hydrostatik*



<https://www.youtube.com/watch?v=Oe-JStsN-Wo>



**FIM DA AULA**