

# PROJETO MECÂNICO (SEM 0347)

Notas de Aulas v.2021

*Aula 06 – Movimentação linear*

Professor: Dr. Carlos Alberto Fortulan



*“Uma descoberta básica de nossa experiência em lidar com usinagem de precisão é que as máquinas-ferramentas são **determinísticas**. Com isso, queremos dizer que os erros da máquina-ferramenta obedecem às relações de causa e efeito e não variam aleatoriamente sem motivo. Além disso, as causas não são esotéricas e incontrolláveis, mas podem ser explicadas em termos de princípios familiares de engenharia. Essas explicações não são simplesmente suposições educadas (ou incultas), mas são baseadas em testes que são projetados para isolar as fontes de erro. Uma vez isolado, geralmente verifica-se que a fonte de erro pode ser reduzida a um nível satisfatório por meios relativamente simples e baratos.”*

[Donaldson, 1972]



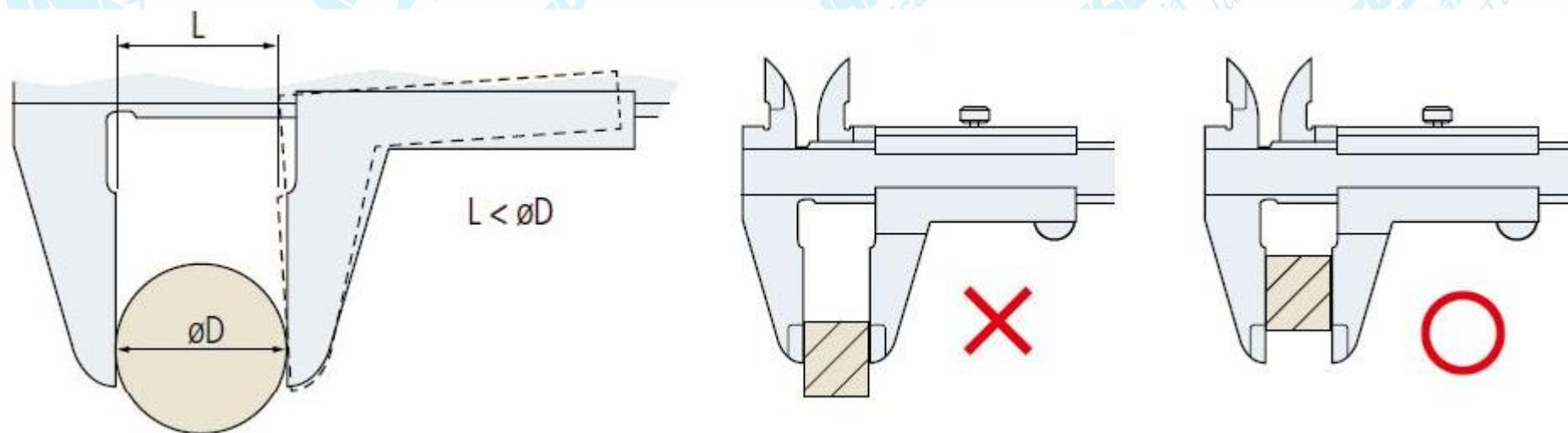
# Determinismo

O determinismo é uma filosofia de projeto que se aplica ao conceito de máquinas de precisão e baseia-se na capacidade de explicar o comportamento de sistemas e processos pelas leis físicas, onde todos os aspectos de um sistema ou processo podem ser compreendidos e controlados.

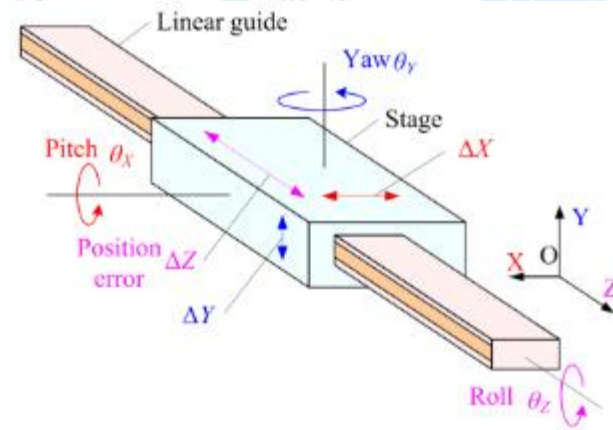
A identificação das fontes de erro e de seu controle podem ser feitos por métodos sistemáticos.

# Princípio de ABBÉ

O primeiro princípio de projeto de máquina-ferramenta relacionado com a metrologia dimensional é o Princípio Abbé, que expressa a possibilidade, na verdade a inevitabilidade, de um **erro em seno** sempre que a medição de distância e a escala não se encontram na mesma linha, mas sim são separados por o que ficou conhecido como offset Abbé. O termo **erro em seno** indica que o mecanismo de erro é devido ao movimento angular do sistema deslizante agindo através de um braço de alavanca (o deslocamento Abbé).

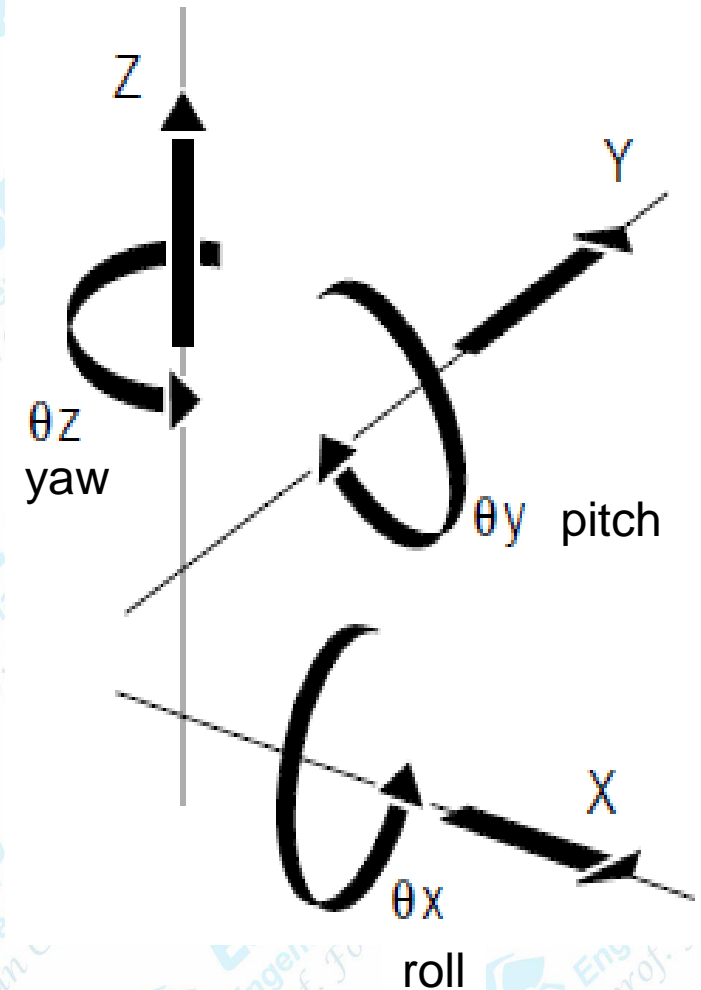






# Movimentação linear

- O sistema de posicionamento pode ser considerado como tendo 6 graus de liberdade: 3 lineares (x,y,z) e três rotacionais em torno destes 3 mesmos eixos.
- Todo movimento pode ser considerado como composto por translação e rotação ao longo destes eixos.
- A movimentação de translação retilínea em um ou nos três eixos denomina-se de **movimentação linear**.





# Tipos de Movimentação linear

- Contínua
- Intermitente
- Reciprocating
- Irregular ou aleatória



# Fonte da Movimentação

- **Direta** → atuadores: hidráulicos; pneumáticos; vapor

- **Indireta (conversão)** → rotação

- Parafuso
- Cremalheira
- Cames
- Correia

...

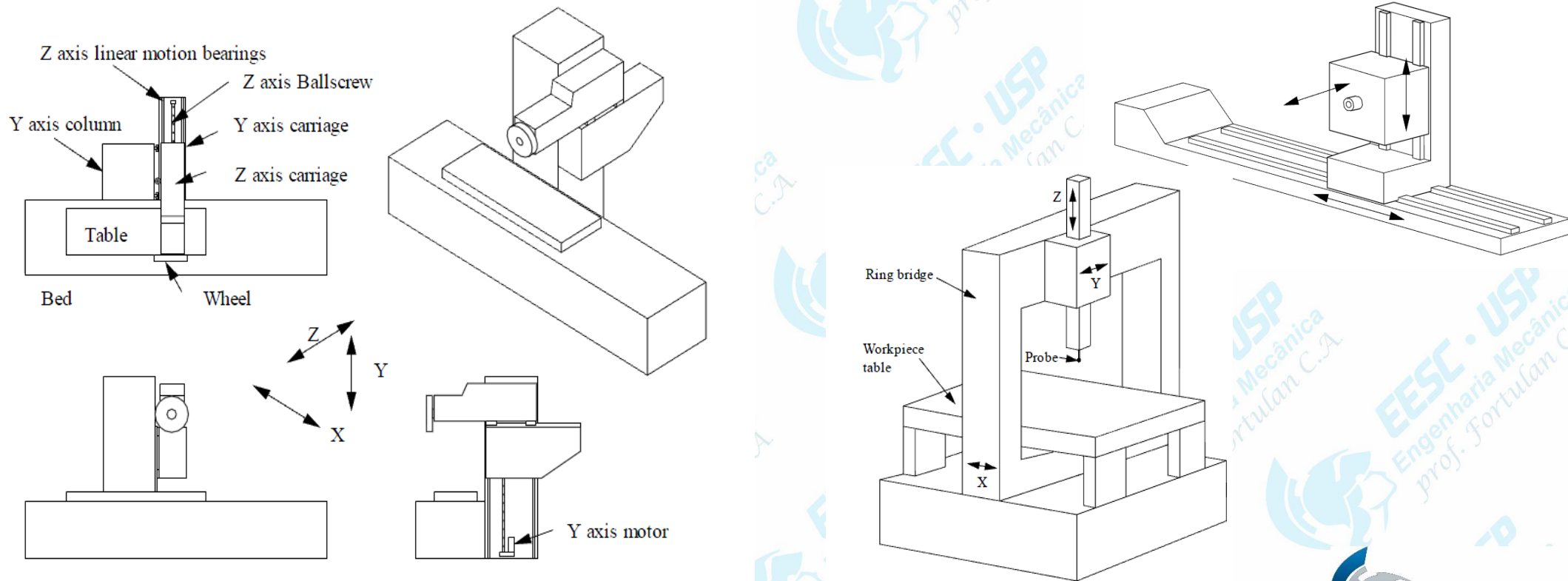
linear/linear: cunha

• ....



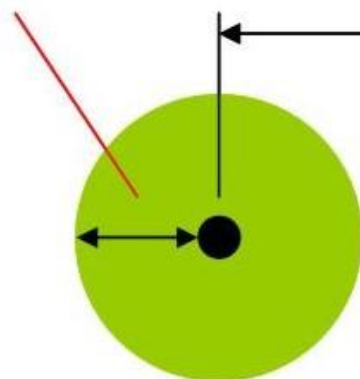
# Guias Lineares

São componentes que permitem o movimento linear com precisão e operação suave recebendo cargas de qualquer direção. Aplicações industriais: CNC, máquinas operatrizes, equipamentos de manuseio de materiais, robôs industriais, equipamentos médicos, ópticos e outros.



**Repetibilidade**

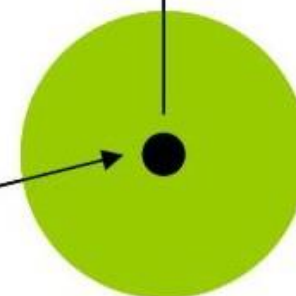
**Resolução**



**Ponto 2**



**Ponto de Interesse**



**Ponto 1**

**Acurácia**

**Precisão**

|          |       | Acurácia |      |
|----------|-------|----------|------|
|          |       | Baixa    | Alta |
| Precisão | Baixa |          |      |
|          | Alta  |          |      |

ISO 5725-2, ISO 5725-3,  
ISO 5725-4,



# Refleta...

## Em uma Máquina Ferramenta o que significa:

Precisão: ?

Acuracidade: ?

Resolução: ?

Repetibilidade: ?



# Características das guias Lineares

|   |   |   |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Pequena diferença entre <math>\mu_e</math> e <math>\mu_d</math>;</li><li>• Variação de força de atrito devido a velocidade deve ser pequena;</li><li>• Baixo <i>stick-slip</i>.</li></ul> | → | Posicionamentos precisos com guias lineares alimentadas em baixas e altas velocidades e de estável. |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Baixa força de atrito</li></ul>   | → | Alta velocidade, economia de energia e baixa geração de calor                                       |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Perda mínima de precisão devido ao desgaste.</li></ul>  | → | Manutenção da precisão por um tempo prolongado  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Predição da expectativa de vida.</li></ul>  | → | Ótimo projeto para a vida requerida   |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Facilidade de projeto;</li><li>• Unidade de mancal linear com qualidade garantida.</li></ul>  | → | Menor custo de montagem.<br>Garantia de qualidade estável.  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Fácil manutenção</li></ul>  | → | Baixo custo de operação   |



# Funções e requisitos desejáveis de uma Guia Linear:

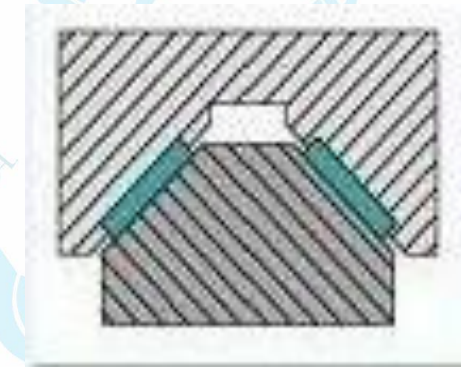
- Manter o alinhamento do movimento mesmo sob ação de carregamentos;
- Permitir a compensação de possíveis desgastes;
- Evitar travamentos e stick slip;
- Propiciar a remoção dos cavacos e debris ainda factível de limpeza;
- Permitir a lubrificação;
- Disponível e economicamente acessível.



# 1. Tipos de Mancais de Movimentação Linear

Mancais lineares tem as funções simultâneas de suportar carga e guiar o movimento linear, são subdivididas em 4 principais grupos:

- **Mancais lineares de deslizamento**
- **Mancais lineares de elementos rolantes**
- **Mancais lineares Hidrostáticos ou aerostático**
- **Mancais lineares Magnéticos**





# 1.1. Mancais lineares de deslizamento

O mais **simples**, **antigo** e de **baixo custo** tem ainda hoje uma larga faixa de aplicação. Em geral é o que tem o **maior** coeficiente de atrito e isto o torna inferior para aplicações de precisão. A lubrificação é feita com aprisionamento de lubrificantes entre as duas partes (rasqueteadado) que com o movimento relativo se forma um filme fino.

<https://www.youtube.com/watch?v=BVjUDkD29qo>

- ✓ Solução mais antiga;
- ✓ Construção mais simples e econômica;
- ✓ Distribuição da carga sobre uma área relativamente grande (tensões de contato mais baixas);
- ✓ Elevada rigidez e amortecimento.

# Uni-guide

MODULAR GUIDE SYSTEM

Engineered two-piece sub-assembly eliminates tolerance stack-up and provides design flexibility.





## Desvantagens:

- Atrito elevado;
- Grande diferença entre o seu atrito estático e atrito dinâmico;
- Difícil controle da operação de posicionamento, pois variação de cargas externas e velocidades afetam grandemente a força de atrito;
- Pobre precisão de posicionamento, particularmente a repetibilidade;
- Não adequado para aplicações em veloc. extremamente baixa ou altas;
- Difícil prever a sua vida.
- Difícil prever a sua rigidez. Portanto, de difícil concepção otimizada;
- A precisão requer frequente e periódica **manutenção**;
- Sua qualidade depende em grande parte do rasquetamento e do ajuste da folga, etc.





<https://www.youtube.com/watch?v=T5hmCRnEvGI>



# Pares em contato

Metal – metal

Metal – polímero

Polímero – cerâmica

Cerâmica – cerâmica

Cerâmica - metal



# Par metal-metal

- ✓ Aço sobre **Fofo**: propriedade de lubrificação inerente com material endurecido (maior resistência mecânica) e menor desgaste (elevada rigidez e capacidade de carga);
- ✓ **Fofo** sobre **Fofo**: grande utilização devido à lubrificação inerente (grafite), boa usinabilidade e menor desgaste em condição operacional;
- ✓ Aço sobre **Latão (ou bronze)**: baixo atrito do par em contato;
- ✓ Aço sobre **Bronze Poroso**: reservatório de lubrificante.

**Operação:** o lubrificante é trazido para a superfície, reduzindo  $\mu$ , em sistema fechado em *loop* pode-se regular o coeficiente de atrito e o calor gerado.



# Par polímero - metal ou cerâmica

<https://www.youtube.com/watch?v=SLXX4kHNp5s>

- ✓ **Polímeros** sobre outros **materiais**: Por exemplo, PTFE são utilizados quando é necessário reduzir o efeito de “stick-slip” (coeficiente de atrito estático, próximo ao dinâmico)
- ✓ Fina camada aderida (transferência) à superfície metálica (cuidados operacionais).
- ✓ Exemplo: Turcite® (Pressão máxima:  $140 \text{ N/mm}^2$ ; velocidade máxima  $2,5 \text{ m/s}$ , Temperatura máxima:  $280^\circ\text{C}$  e Mínima:  $-200^\circ\text{C}$  e coeficiente de atrito sem lubrificação:  $0,02 - 0,2$ )

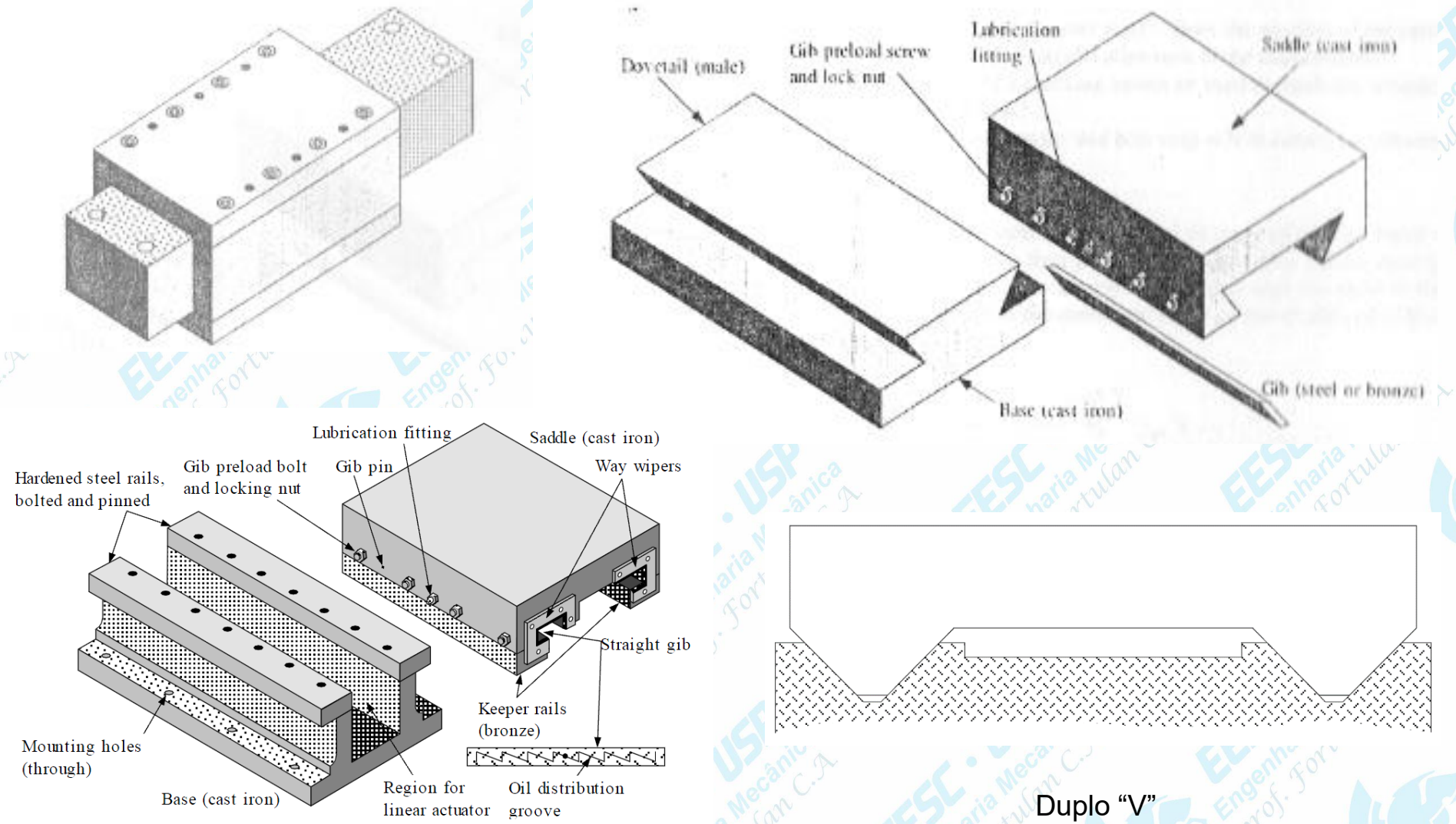


# Par cerâmica – cerâmica/metal/polímero

✓ **Cerâmica** sobre outros **materiais**: Elevada dureza, baixo desgaste, vida útil elevada\*.

- ✓ Difícil usinagem, distorção (compensação);
- ✓ Alumina, Carbetto de silício e Zerodur®.





Slocum AH. Precision Machine Design. Prentice Hall 1992 p. 437, 439



# Exemplos de guias lineares

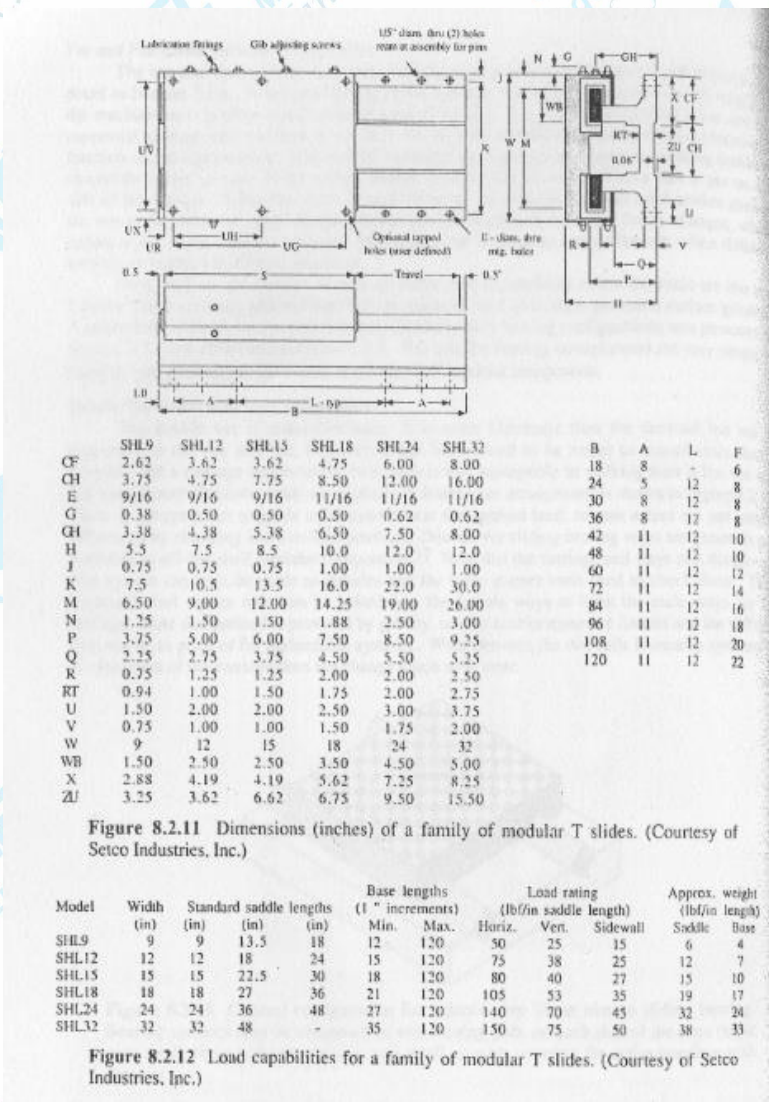


Figure 8.2.11 Dimensions (inches) of a family of modular T slides. (Courtesy of Setco Industries, Inc.)

| Model | Width (in) | Standard saddle lengths (in) |      | Base lengths (1" increments) |      | Load rating (lb/in saddle length) |       |          | Approx. weight (lb/in length) |      |
|-------|------------|------------------------------|------|------------------------------|------|-----------------------------------|-------|----------|-------------------------------|------|
|       |            | (in)                         | (in) | Min.                         | Max. | Horiz.                            | Vert. | Sidewall | Saddle                        | Base |
| SHL9  | 9          | 9                            | 13.5 | 18                           | 120  | 50                                | 25    | 15       | 6                             | 4    |
| SHL12 | 12         | 12                           | 18   | 24                           | 15   | 120                               | 75    | 38       | 12                            | 7    |
| SHL15 | 15         | 15                           | 22.5 | 30                           | 18   | 120                               | 80    | 40       | 15                            | 10   |
| SHL18 | 18         | 18                           | 27   | 36                           | 21   | 120                               | 105   | 53       | 19                            | 17   |
| SHL24 | 24         | 24                           | 36   | 48                           | 27   | 120                               | 140   | 70       | 45                            | 32   |
| SHL32 | 32         | 32                           | 48   | -                            | 35   | 120                               | 150   | 75       | 50                            | 38   |

Figure 8.2.12 Load capabilities for a family of modular T slides. (Courtesy of Setco Industries, Inc.)

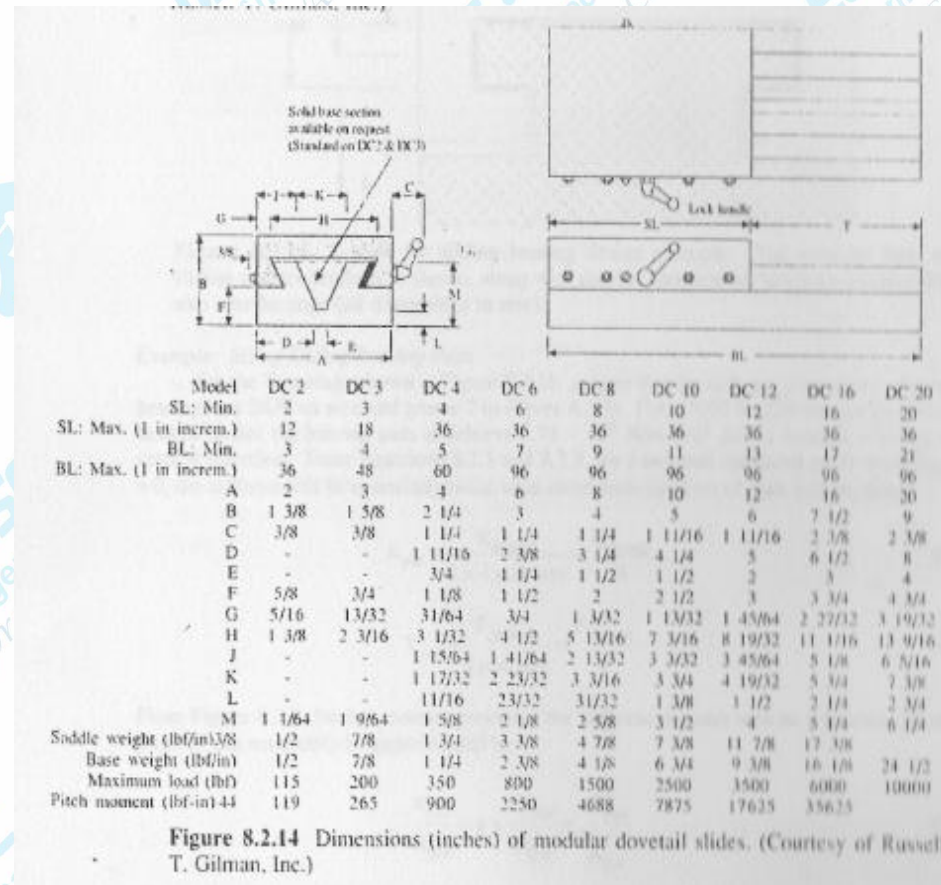


Figure 8.2.14 Dimensions (inches) of modular dovetail slides. (Courtesy of Russell T. Gilman, Inc.)

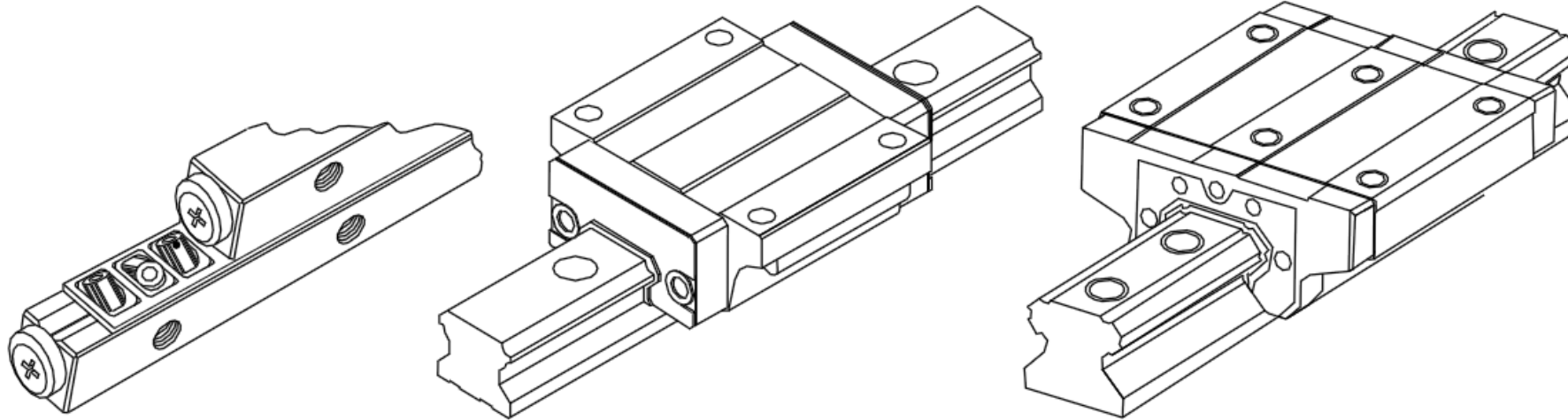








## 1.2. Mancais lineares de elementos rolantes



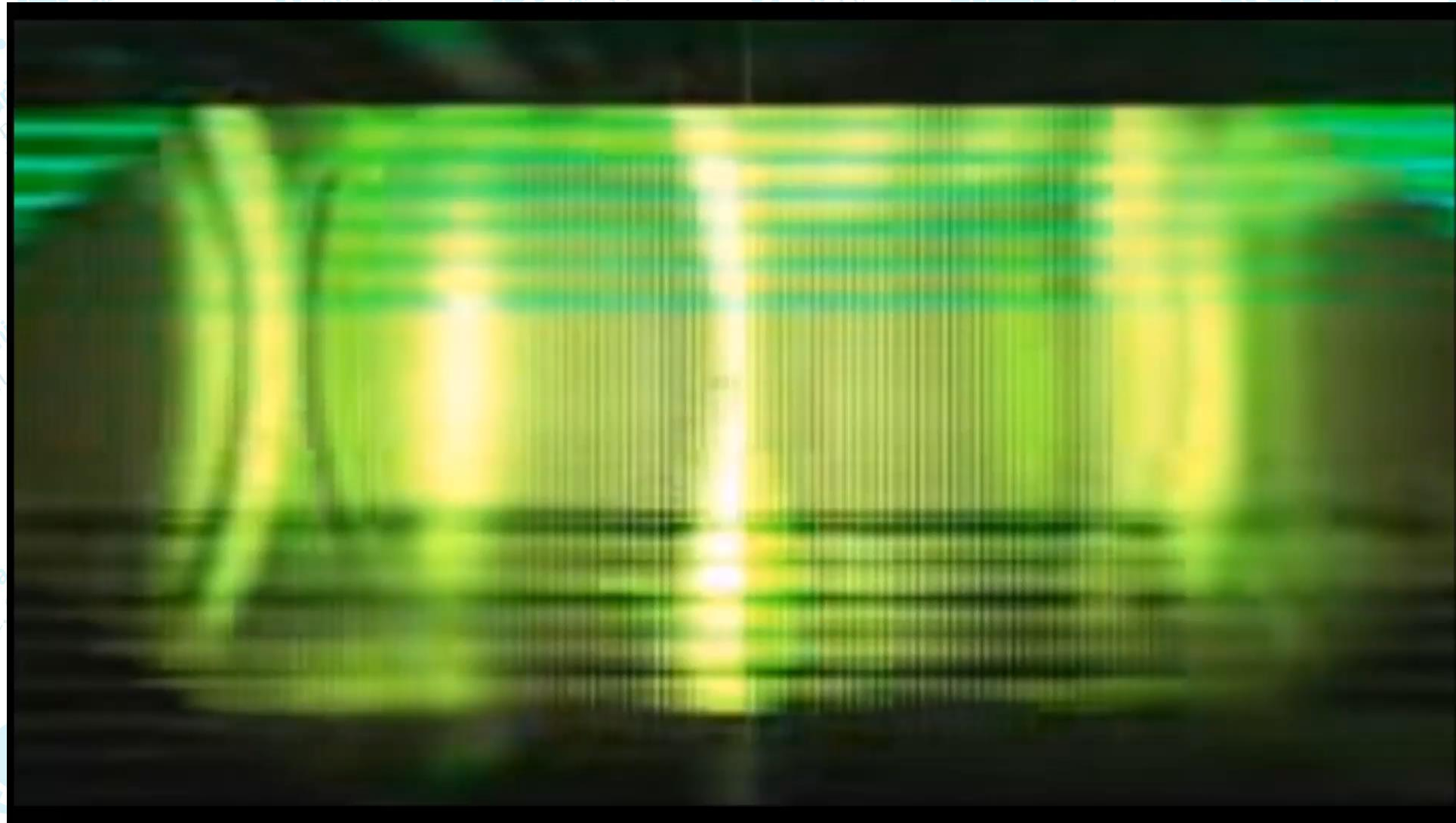
Nonrecirculating roller bearing

Recirculating ball bearing

Recirculating roller bearing

Neste tipo, via elementos rolantes, há a diminuição do atrito entre as partes em movimento.

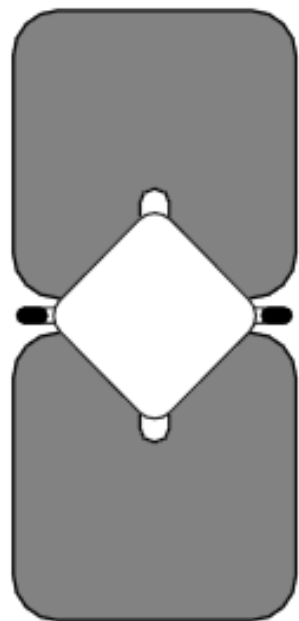
Devido sua superioridade e disponibilidade, este tipo de mancal tem recebido a preferencia em equipamentos que requerem operação com alta velocidade, alta acuracidade de posicionamento, alta precisão e operação livre de manutenção.



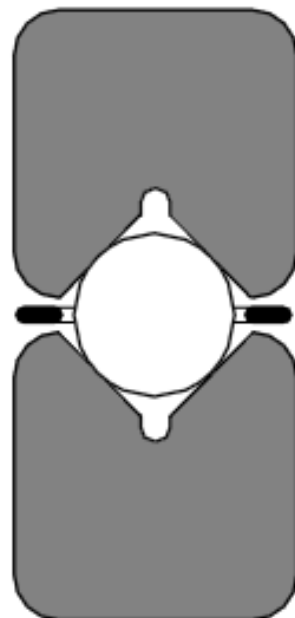
[https://www.youtube.com/watch?v=2I44OT7c\\_MY](https://www.youtube.com/watch?v=2I44OT7c_MY)



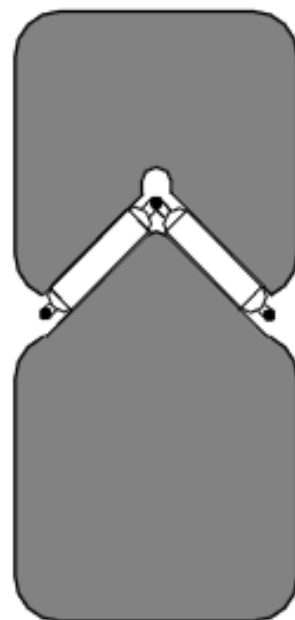
# Tipos de Elementos Rolantes



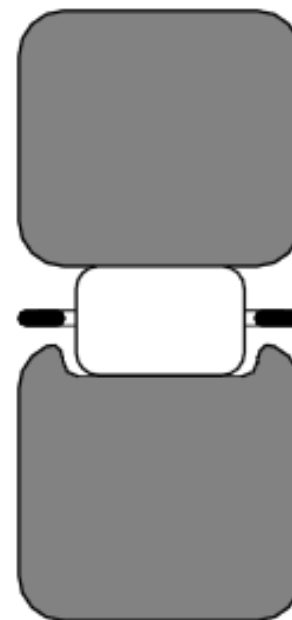
Crossed rollers



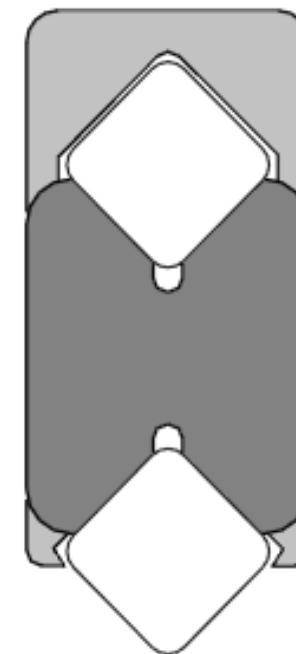
Balls



Needles

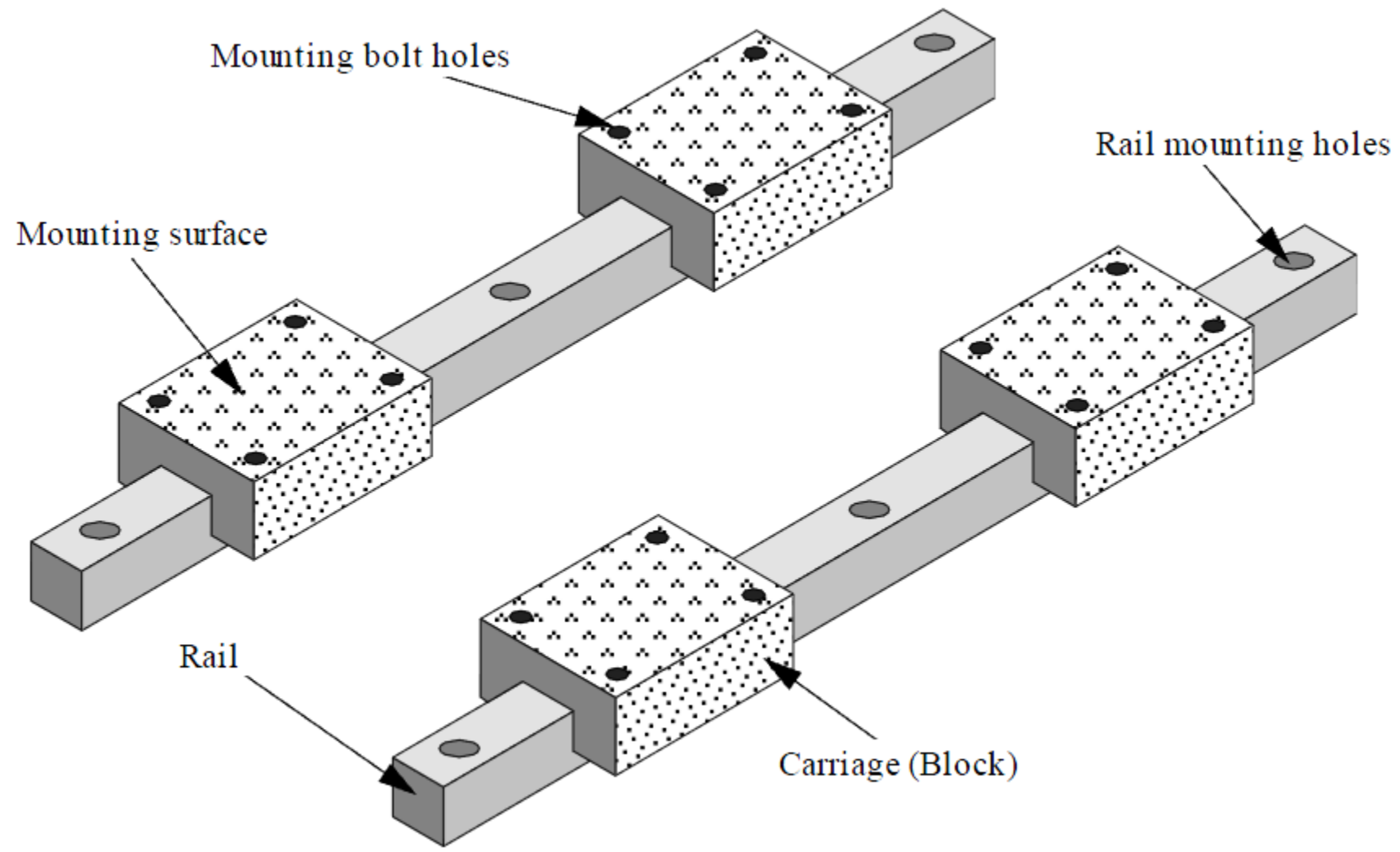


Rollers

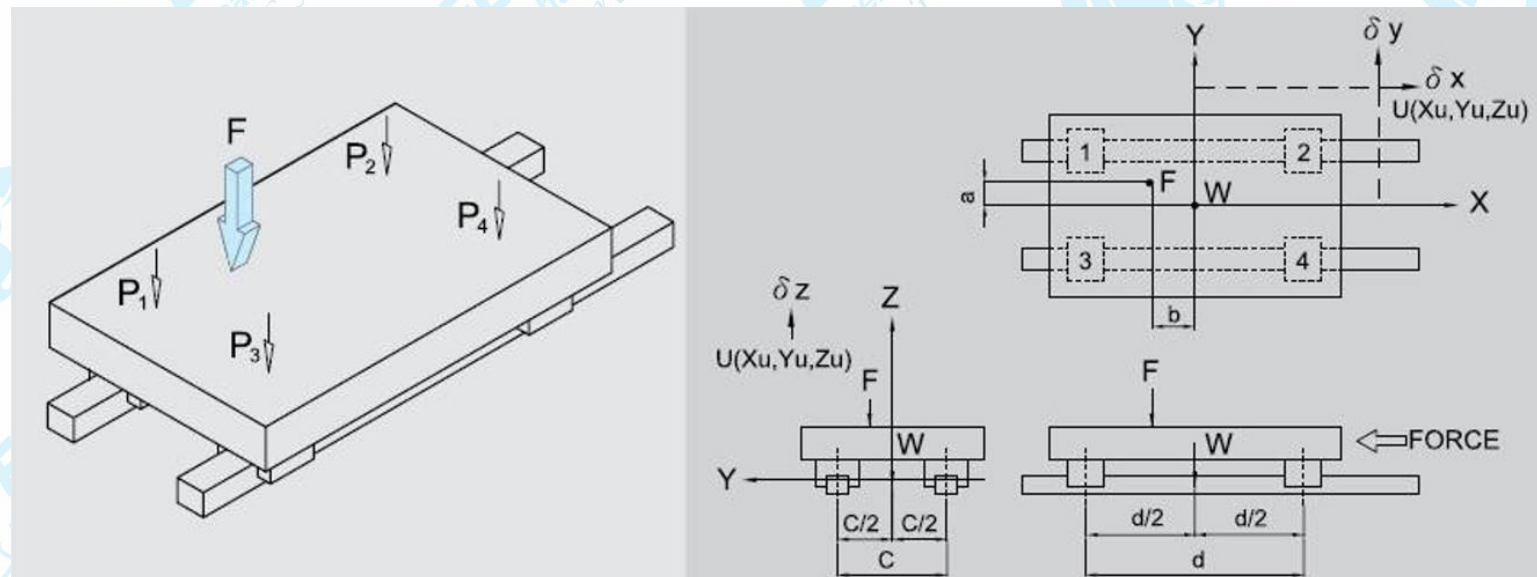


Recirculating  
crossed rollers

# Trilho e patins







$$P_1 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d}$$

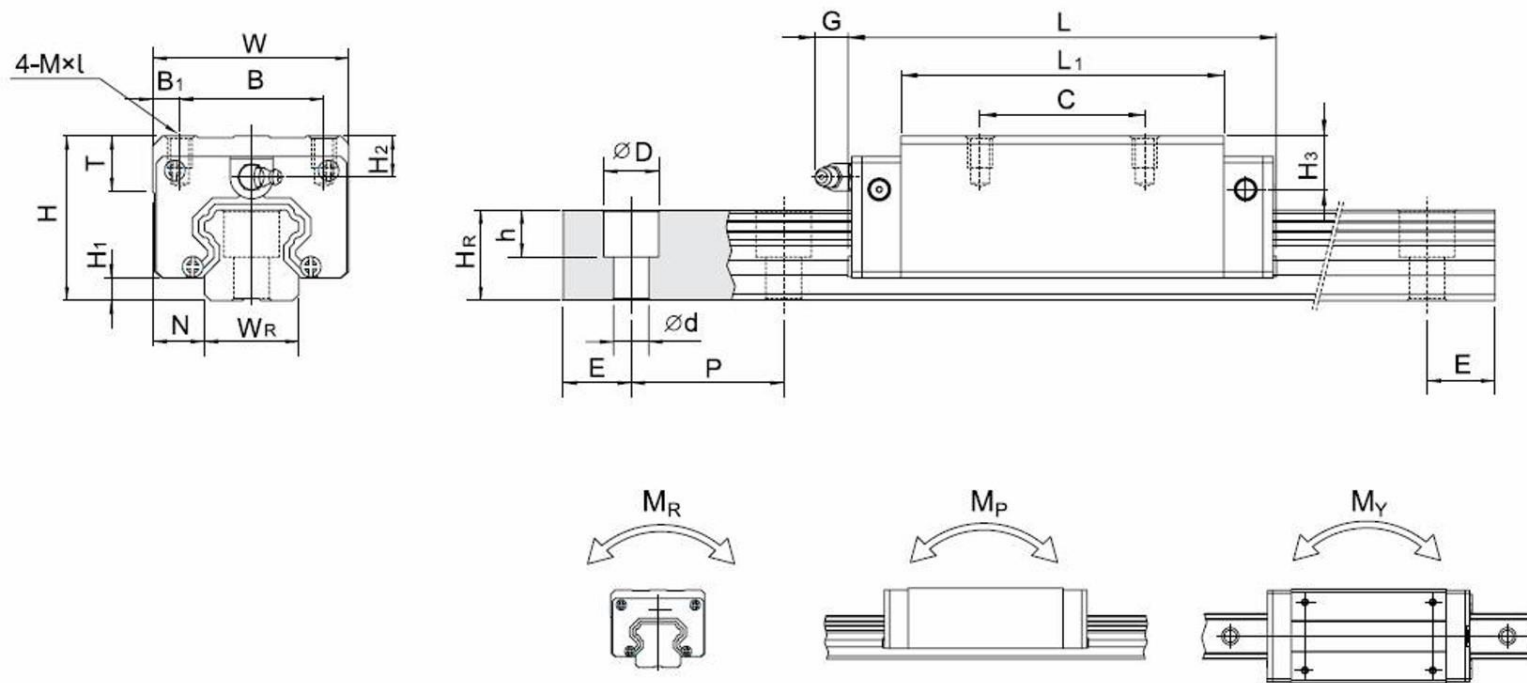
$$P_2 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d}$$

$$P_3 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d}$$

$$P_4 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d}$$

HIWIN

(1) HGH-CA / HGH-HA



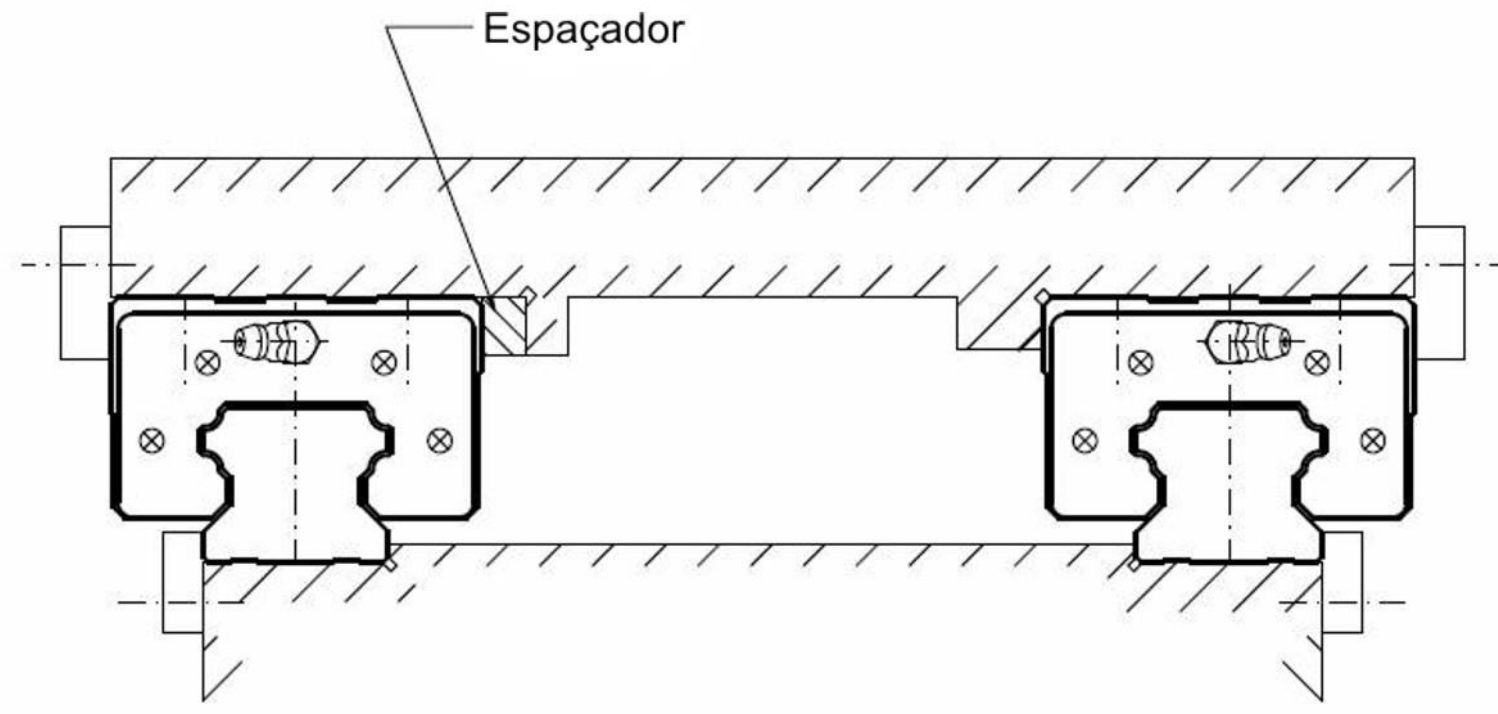
| Model No. | Dimensions of Assembly (mm) |                |     | Dimensions of Block (mm) |    |                |    |                |      |     |      |   |                | Dimensions of Rail (mm) |                |                |     |     | Mounting Bolt for Rail (mm) | Basic Dynamic Load Rating C (kN) | Basic Static Load Rating C <sub>0</sub> (kN) | Static Rated Moment |       |       | Weight         |                |                |       |      |
|-----------|-----------------------------|----------------|-----|--------------------------|----|----------------|----|----------------|------|-----|------|---|----------------|-------------------------|----------------|----------------|-----|-----|-----------------------------|----------------------------------|--|---------------------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|-------|------|
|           | H                           | H <sub>1</sub> | N   | W                        | B  | B <sub>1</sub> | C  | L <sub>1</sub> | L    | G   | MxL  | T | H <sub>2</sub> | H <sub>3</sub>          | W <sub>R</sub> | H <sub>R</sub> | D   | h   |                             |                                  |  | d                   | P     | E     | M <sub>R</sub> | M <sub>P</sub> | M <sub>Y</sub> | Block | Rail |
|           | kN-m                        |                |     | kg                       |    | kg/m           |    |                |      |     |      |   |                |                         |                |                |     |     |                             |                                  |  |                     |       |       |                |                |                |       |      |
| HGH 15CA  | 28                          | 4.3            | 9.5 | 34                       | 26 | 4              | 26 | 39.4           | 61.4 | 5.3 | M4x5 | 6 | 8.5            | 9.5                     | 15             | 15             | 7.5 | 5.3 | 4.5                         | 60                               | 20   | M4x16               | 11.38 | 25.31 | 0.17           | 0.15           | 0.15           | 0.18  | 1.45 |

HIWIN



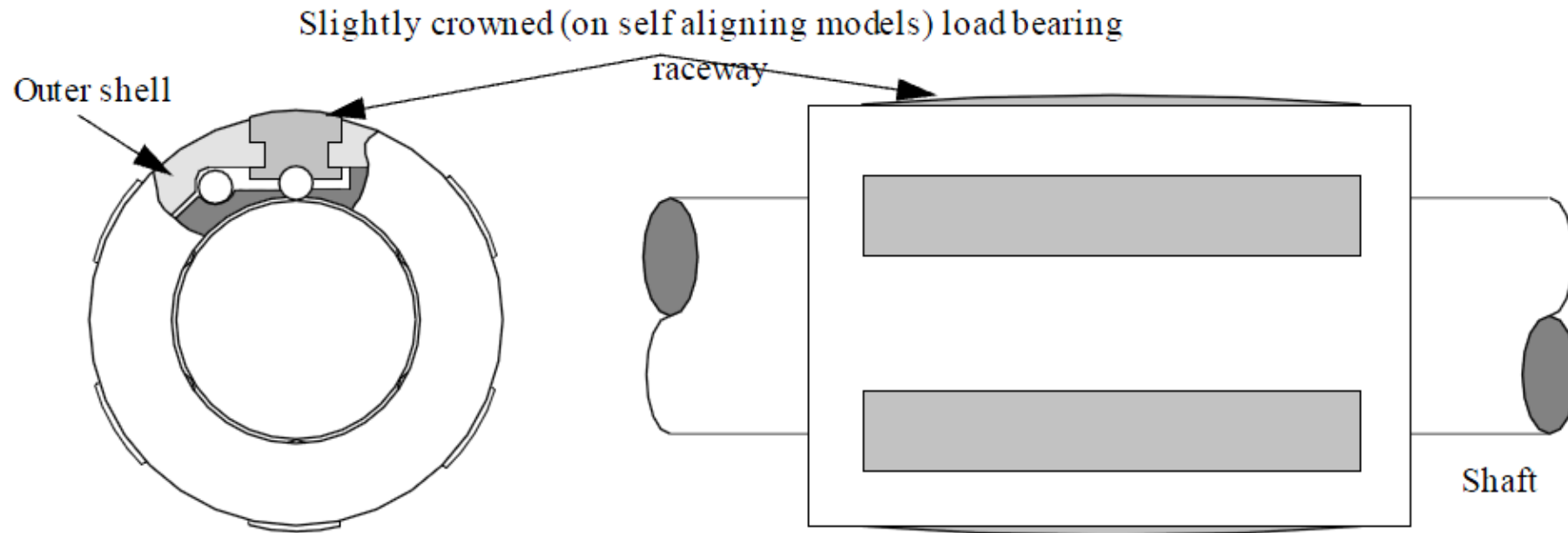
# Trilho e Patins

Instalação com fixação total da superfície

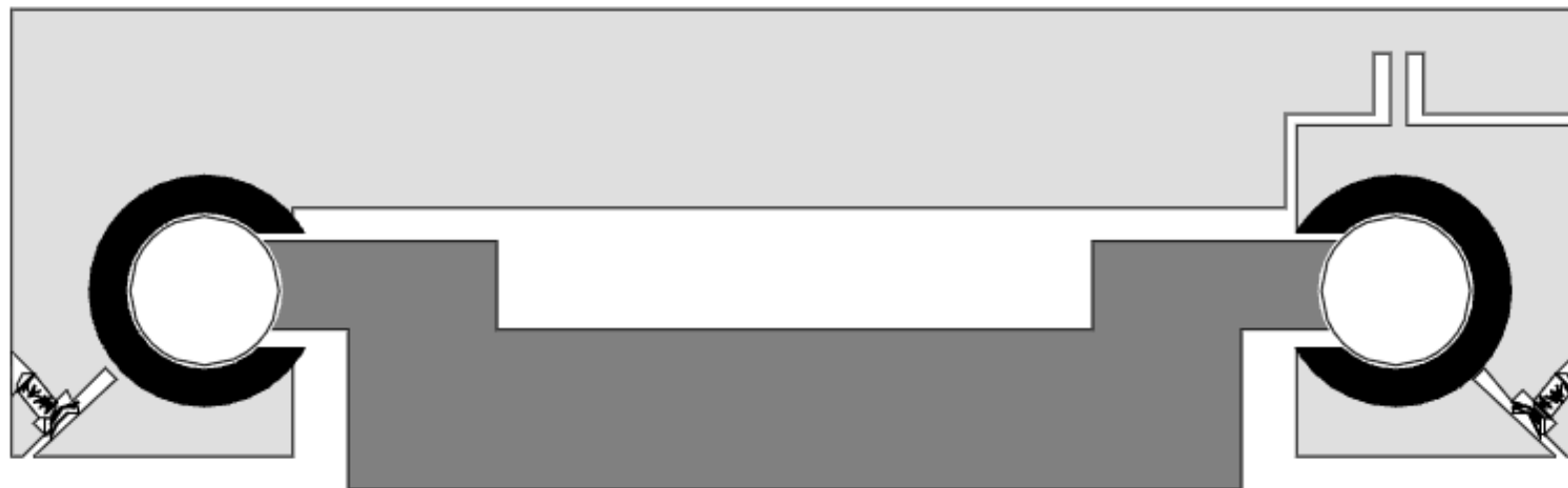


# Ball Bushing™

Inventado por John Thomson em 1950, incorpora esferas recirculantes em eixo cilíndrico.





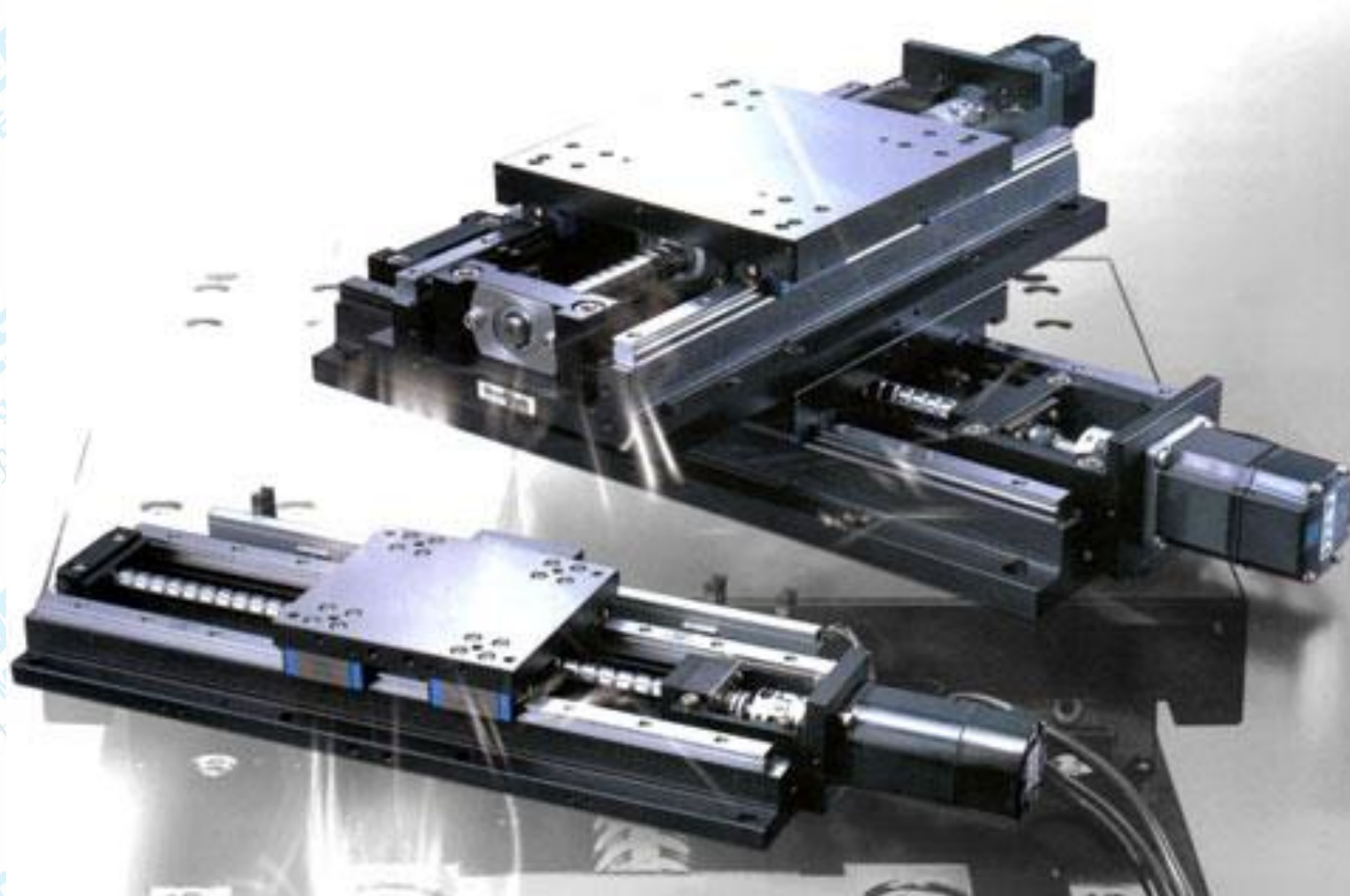


- Requerem lubrificação
- Aplicações:
  - Máquinas ferramentas
  - Sistemas de manipulação e medição
  - Robôs

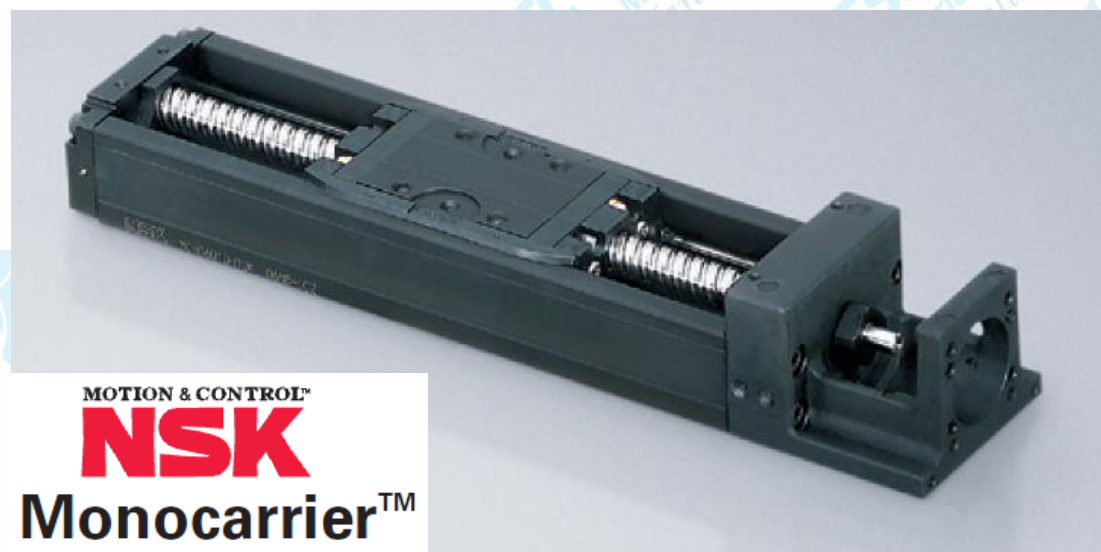
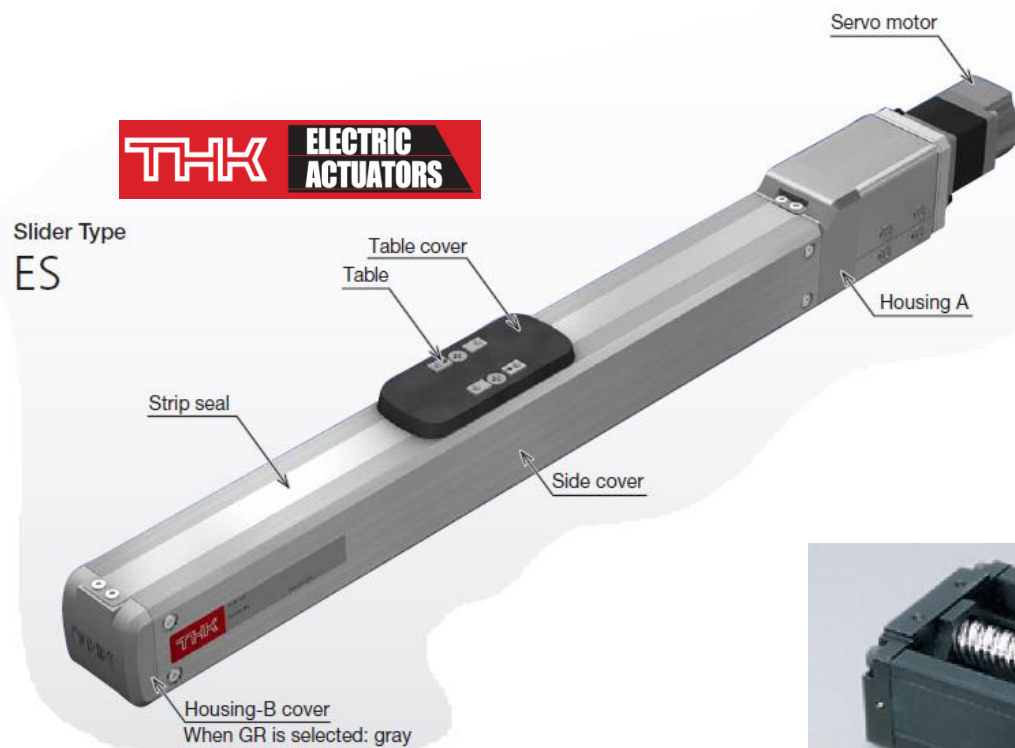




# Mesas



# Atuadores Lineares

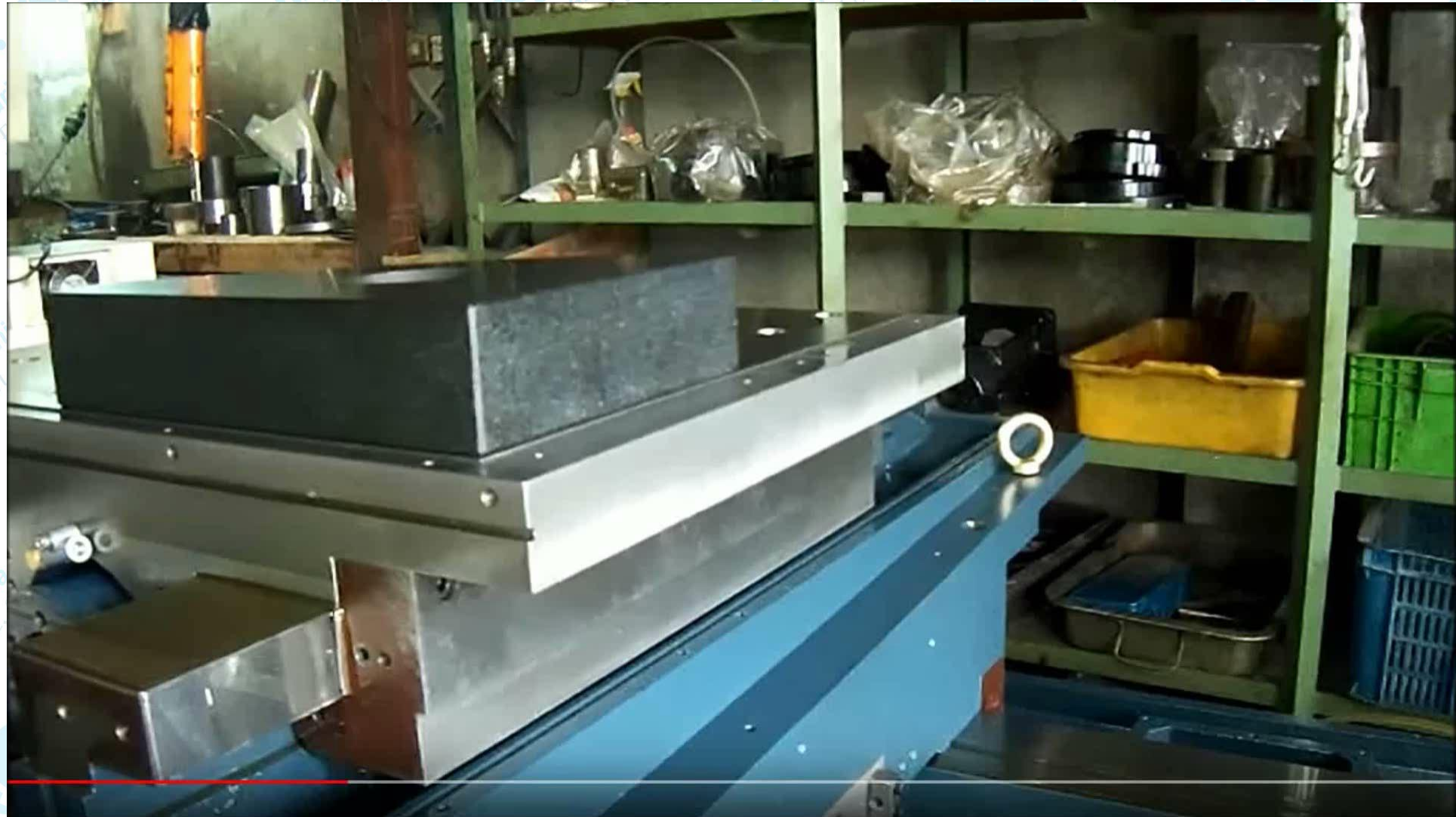




## 1.3. Mancais lineares Hidrostáticos ou Aerostático

- É uma classe de guias **sem** contatos mecânico entre os elementos e, são aplicadas em solicitações de **extrema** acuracidade e necessidade de operação silenciosa.
- Trabalha com o suprimento de um fluído pressurizado entre as partes em movimento relativo, sendo que uma delas, é mantida flutuando sobre o fluído.
- Dependendo sobretudo do fluido em uso, é classificado em mancais lineares aerostático ou hidrostático. Embora este tipo de guia seja muito vantajoso para aplicações especiais, é usualmente de maior custo, de difícil fabricação e requer unidades auxiliares.
- Geralmente utilizados em máquinas de ultra precisão.

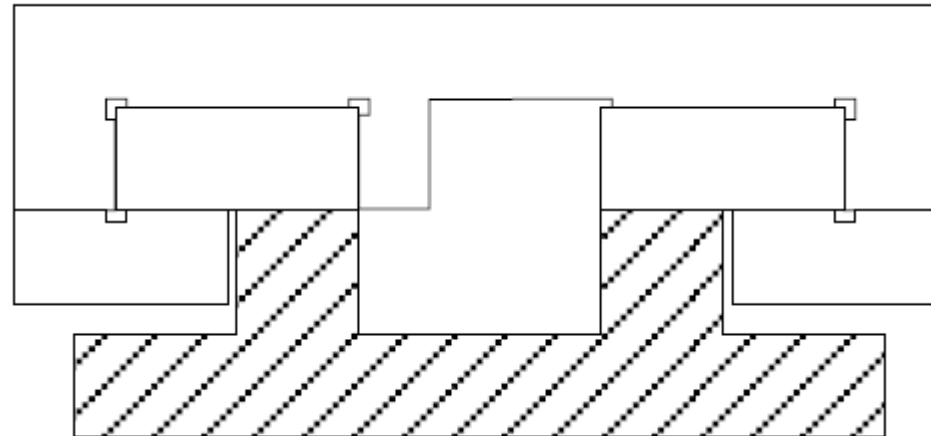
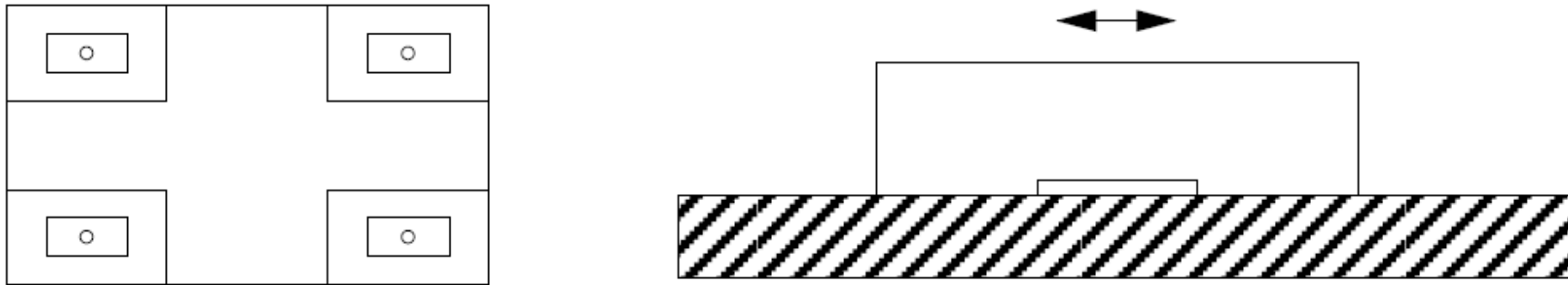






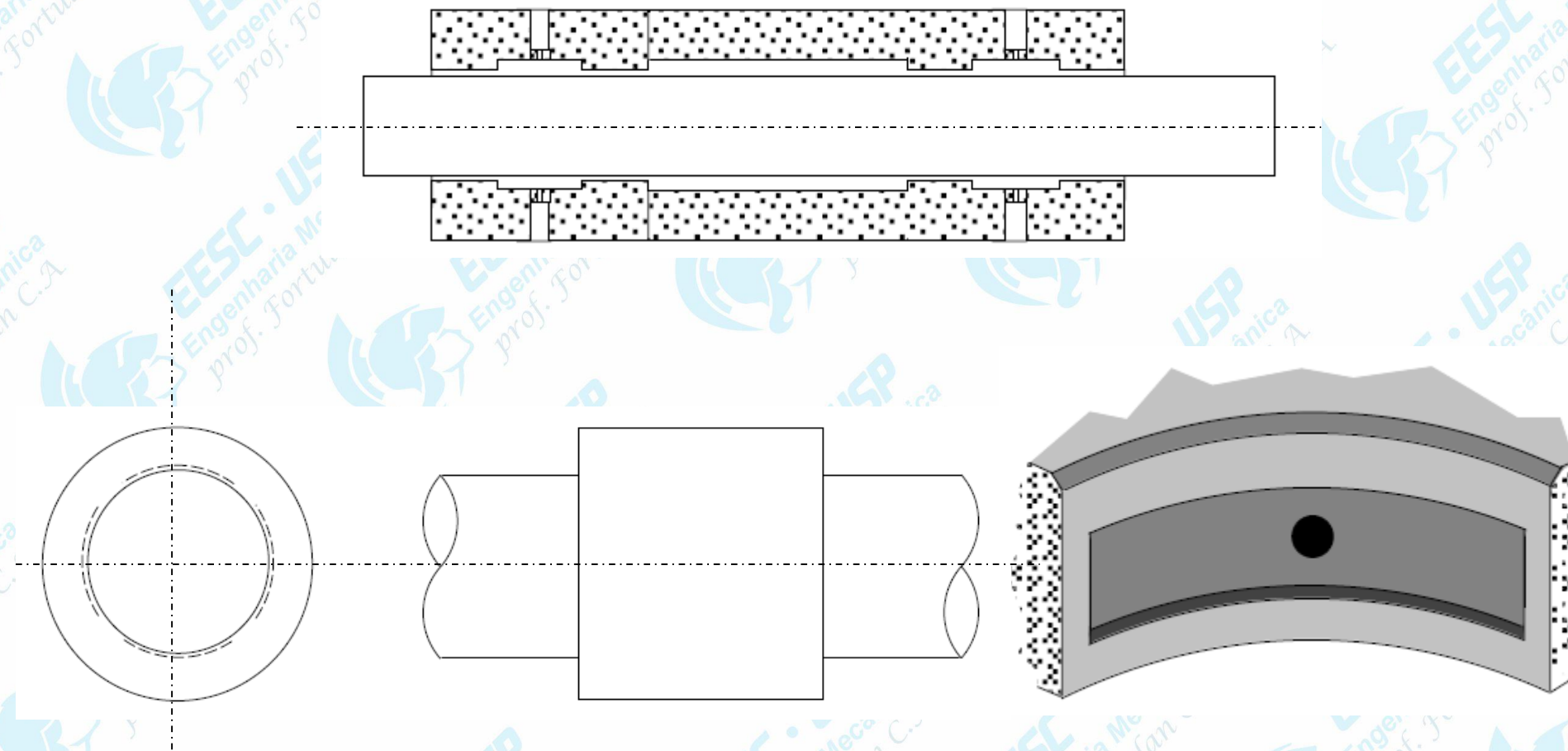
|                 | Hidrostático  | Aerostático  |
|-----------------|---|--|
|                 | Líquido (óleo)  | Gas (ar)   |
| Características | Capilaridade<br>Orifício<br>Slot restritor<br>Diafragma restritor | Poros<br>Orifício<br>Slot restritor  |
| Capac. de carga | Alta  | Moderada   |
| Rigidez         | Muito alta  | Moderada   |
| Damping         | Muito alto  | Moderado-baixo   |
| Atrito          | Baixo em baixa velocidade   | Muito baixo em qquer velocidade  |
| Aplicações      | Altamente confiável para máq. ferramentas                         | Altamente confiável p/ máq. têxteis<br>Requer isenção de contaminação<br>Cabeçotes de retificação<br>Instrumentos de precisão<br>Cabeçotes de dicing |

# Guia Plana



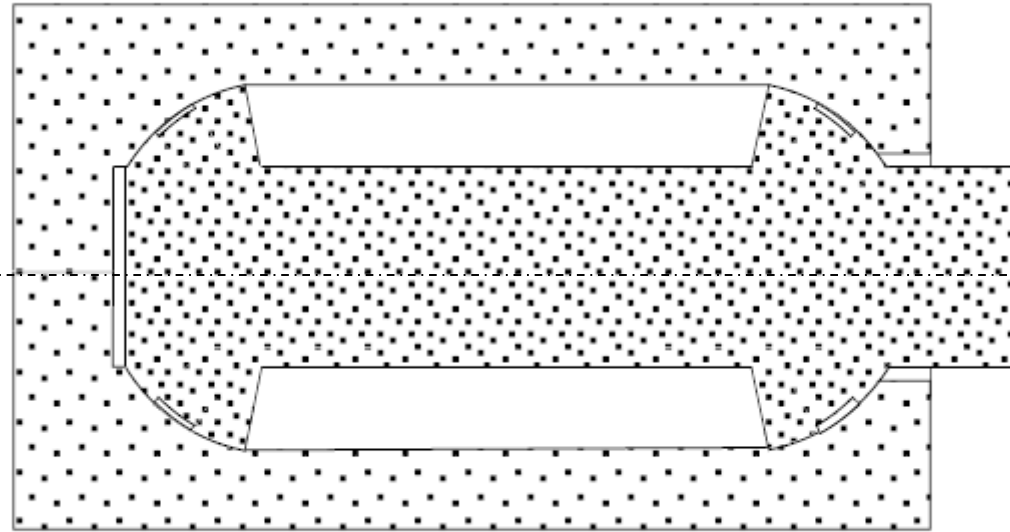


# Guia Cilíndrica



Slocum AH. Precision Machine Design.

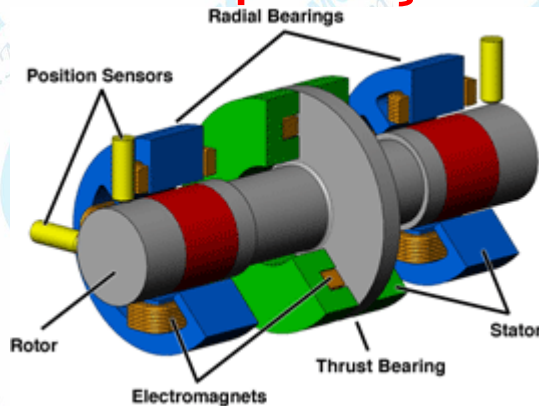
# Guia Esférica ou “thrust bearing”





## 1.4. Mancais lineares Magnéticos

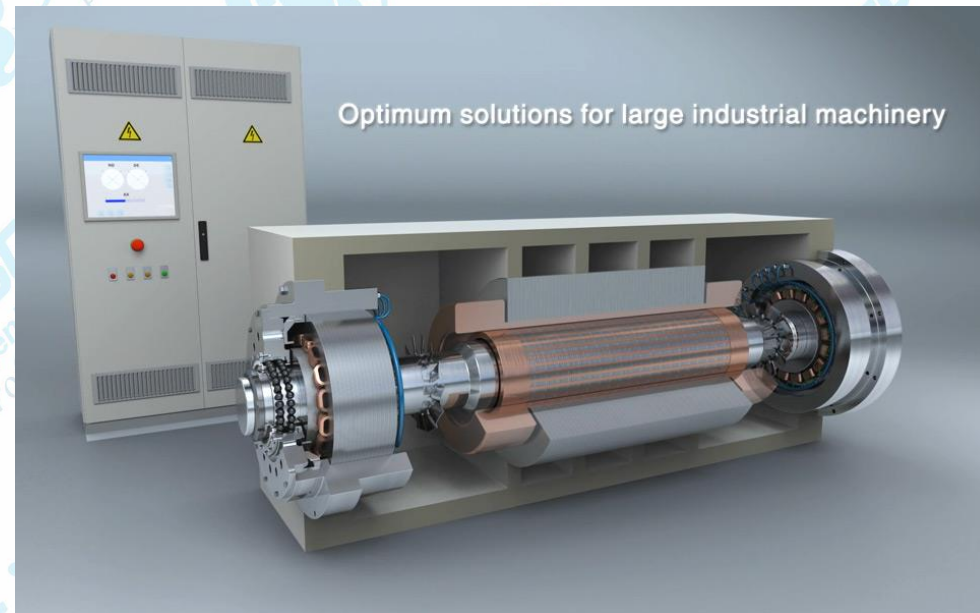
Por meio de força magnética atrativa ou repulsiva uma das partes em contato relativo é mantida flutuando sobre a outra. O uso de eletromagnetismo é de maior custo e seu consumo de energia não é eficiente. **Tem aplicações limitadas.**



<http://www.motioncontrol.co.za/article.aspx?pkarticleid=6877>



Magnetic Levitation Bearings



[https://m.schaeffler.cn/content.mobile.cn/en/product\\_highlights/industry/magnetic\\_bearing\\_1/magnetic\\_bearing.jsp](https://m.schaeffler.cn/content.mobile.cn/en/product_highlights/industry/magnetic_bearing_1/magnetic_bearing.jsp)

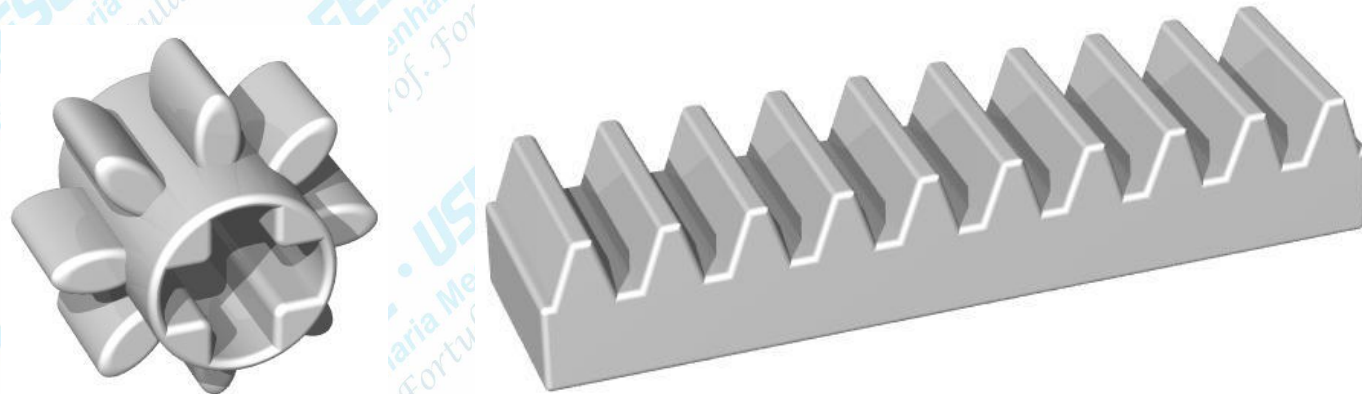
## 2. Atuadores de Movimentação Linear

Rotação x Deslocamento

- Parafuso



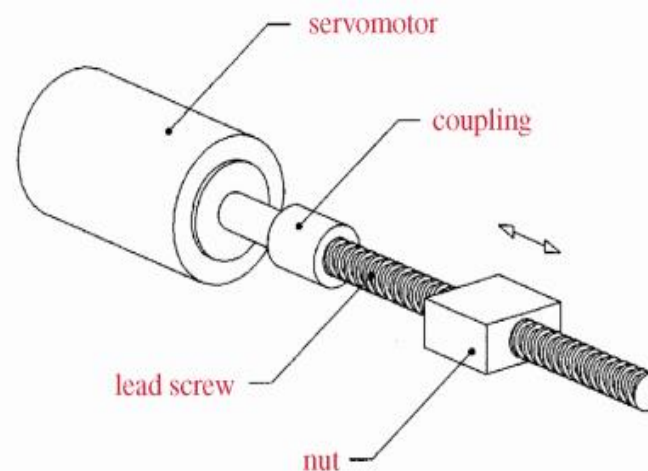
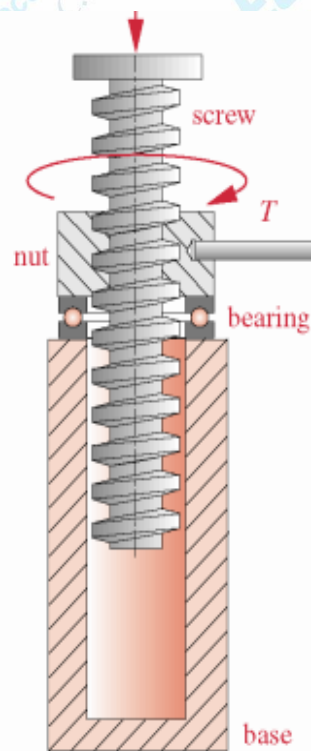
- Cremalheira





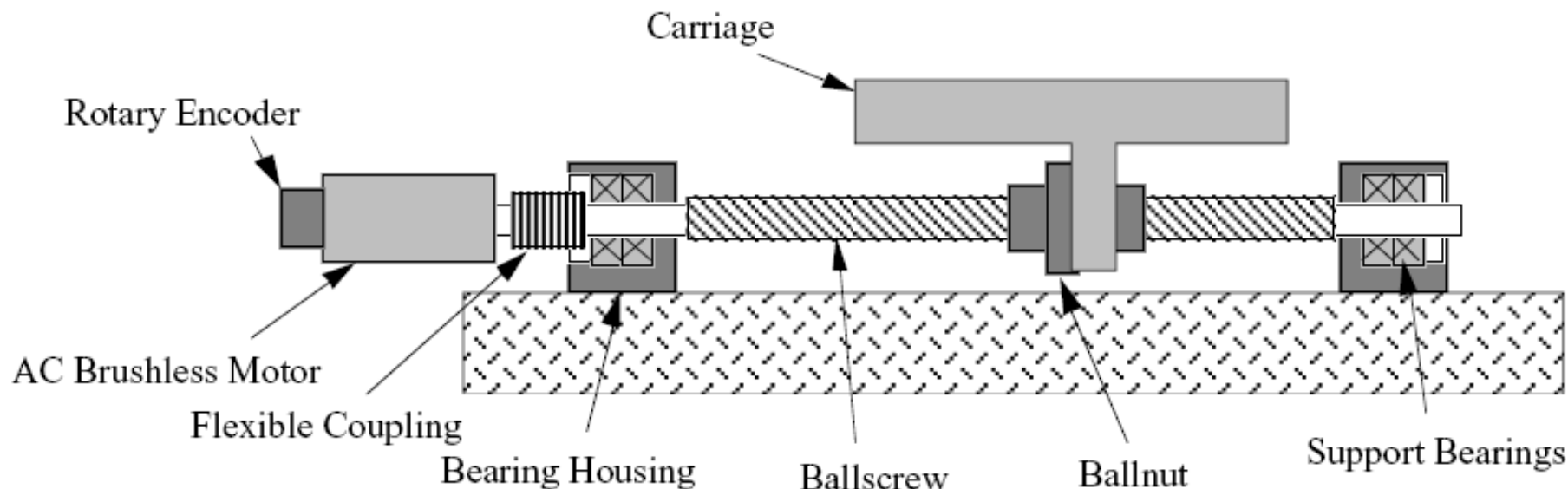
# Parafusos de potência (Lead screw)

- ✓ Dispositivos utilizados para converter movimento de rotação (porca ou parafuso) em um movimento relativamente lento



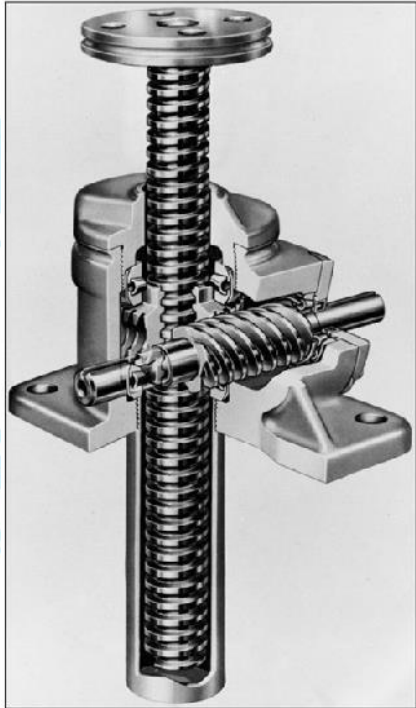
# Objetivos dos parafusos de potência são:

- Elevação de uma carga;
- Prover forças de elevado valor;
- **Posicionamento axial preciso.**

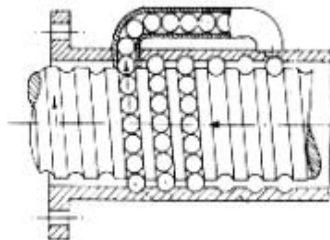
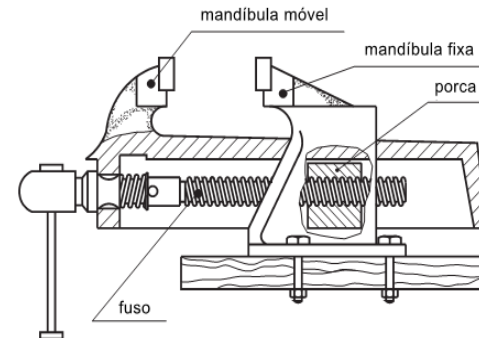
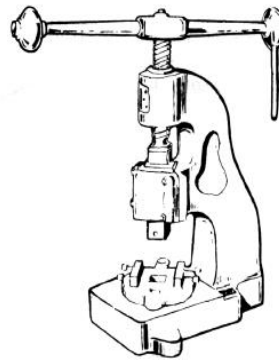
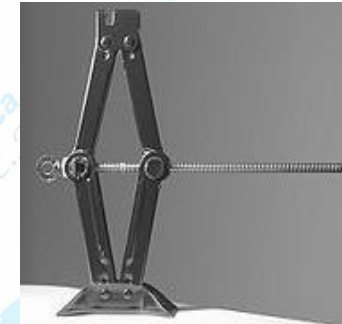




# Parafuso de Potência - (*lead screw*)



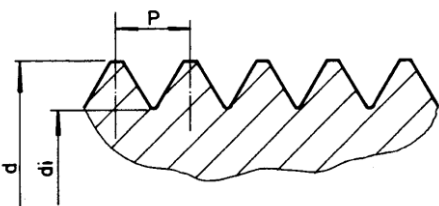
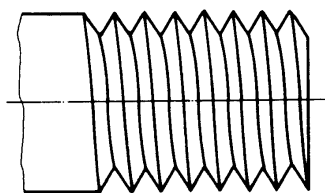
Torno Universal



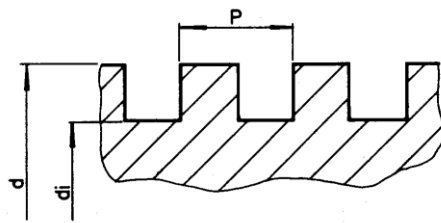
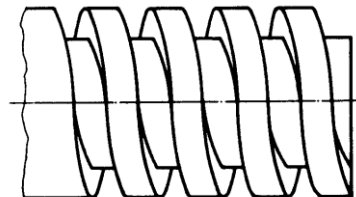


# Tipos de Roscas

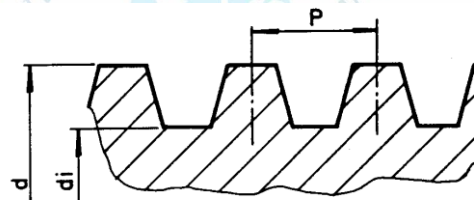
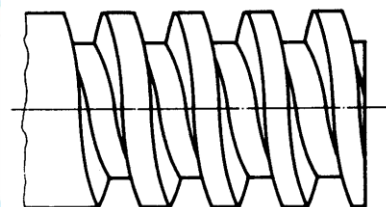
Rosca triangular



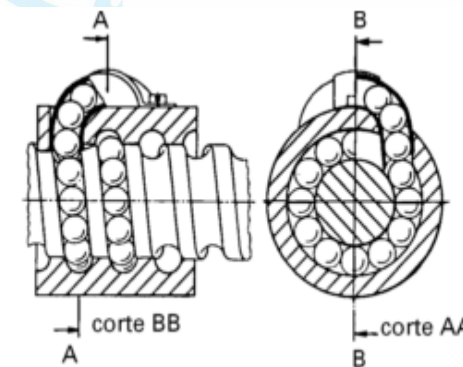
Rosca quadrada



Rosca trapezoidal -Acme-



Fuso de esferas recirculantes





## Parâmetros:

- ✓ O **passo da rosca** ( $p$ ) é a distância entre dois filetes consecutivos;
- ✓ **Avanço**  $l$ , é a distância axial que o parafuso ou a porca percorre em relação ao seu eixo quando completada uma rotação;
- ✓ **Entrada:** é o início da rosca. As roscas podem ter uma ou mais entradas. As roscas com mais de uma entrada promovem um avanço mais rápido. Para uma única entrada de rosca, o avanço é igual ao passo ( $l=n.p$  ou  $l=p$ ).

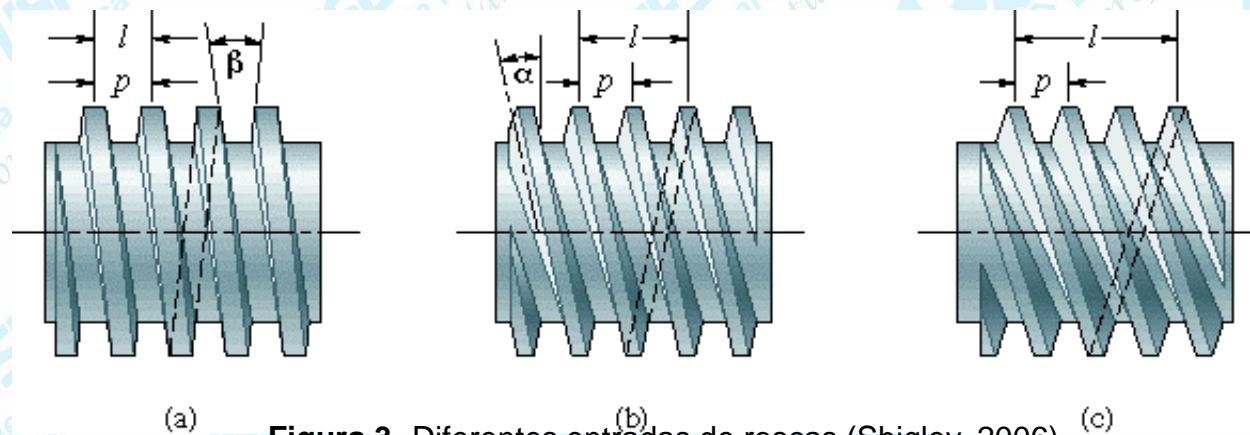


Figura 3- Diferentes entradas de roscas (Shigley, 2006).

# Passos comuns para roscas Quadradas e ACME



|          |                |                |                |                |               |               |               |               |                |                |                |               |                |               |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| $d$ , in | $\frac{1}{4}$  | $\frac{5}{16}$ | $\frac{3}{8}$  | $\frac{1}{2}$  | $\frac{5}{8}$ | $\frac{3}{4}$ | $\frac{7}{8}$ | 1             | $1\frac{1}{4}$ | $1\frac{1}{2}$ | $1\frac{3}{4}$ | 2             | $2\frac{1}{2}$ | 3             |
| $p$ , in | $\frac{1}{16}$ | $\frac{1}{14}$ | $\frac{1}{12}$ | $\frac{1}{10}$ | $\frac{1}{8}$ | $\frac{1}{6}$ | $\frac{1}{6}$ | $\frac{1}{5}$ | $\frac{1}{5}$  | $\frac{1}{4}$  | $\frac{1}{4}$  | $\frac{1}{4}$ | $\frac{1}{3}$  | $\frac{1}{2}$ |
| $d$ , mm | 8              | 10             | 14             | 16             | 20            | 22            | 24            | 30            | 38             | 44             | 40             | 60            | 75             |               |
| $p$ , mm | 1,5            | 2              | 3              | 4              | 4             | 5             | 5             | 6             | 7              | 7              | 8              | 9             | 10             |               |

\* Tabela 8-3 Shigley - pág. 390

\*\*ABNT NBR 5868



# Dimensionamento

Parafusos de rosca métrica:

Torque:  $T = P \cdot d \cdot K \rightarrow K_{\max} = 0,2; K_{\min} = 0,13$

$$T_{(\max)} = 0,2 \cdot P \cdot d$$

$$T_{(\min)} = 0,13 \cdot P \cdot d$$

$d$  = diâmetro nominal do parafuso (m)

$P$  = força (N).

# Rosca Quadrada

Cálculo do Torque, no parafuso de potência:  $T_R$  e  $T_L$

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi \mu d_m}{\pi d_m - \mu l} \right)$$



Elevando a carga

R → raise

$$T_L = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{\pi \mu d_m - l}{\pi d_m + \mu l} \right)$$

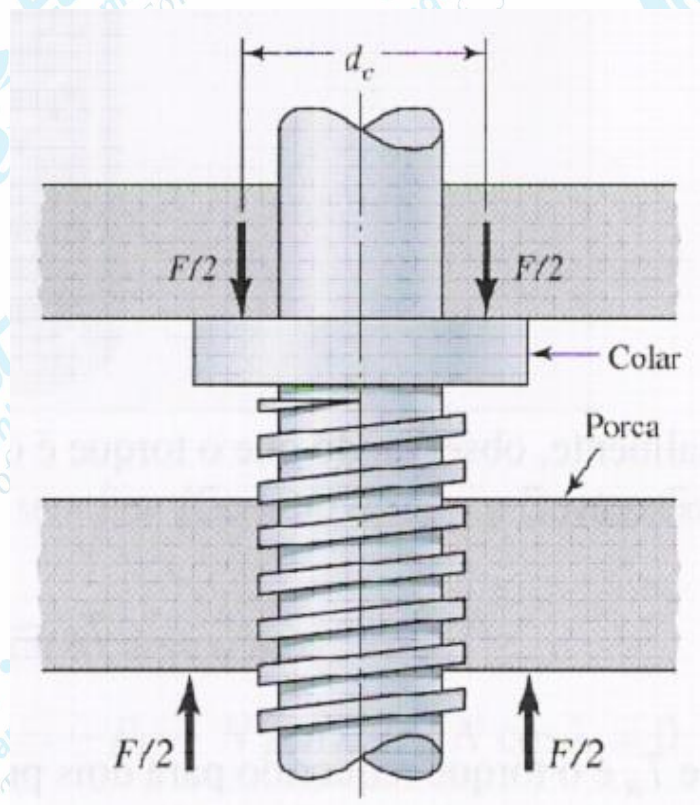


Baixando a carga

L - lower



# Efeito do “Colar” Axial



$$T_c = \frac{F \mu_c d_c}{2}$$

(9)

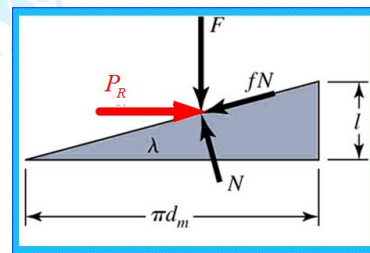
Figura 9 – Colar de empuxo (Shigley, 2004).

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi \mu d_m}{\pi d_m - \mu l} \right) + \frac{F \mu_c d_c}{2}$$



# Condição de auto retenção do parafuso

$$\mu \geq \tan \lambda$$



$$\tan \lambda = \frac{l}{\pi d_m}$$

## Cálculo do rendimento da rosca de transmissão

$$\eta = \frac{T_o}{T_r} = \frac{\text{Torque necessário ideal (sem atrito)}}{\text{Torque necessário com atrito}}$$

$$T_o = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \mu \pi d_p}{\pi d_p - \mu l} \right) = \frac{F l}{2\pi}$$

$$\eta = \frac{F l}{2\pi T_r}$$



$$\eta = \frac{T_o}{T_R} = \frac{F l}{2\pi T_R}$$



## Exercício 6.1 – Parafuso de Potência - Aula 07 – Teórica

Determine a potência necessária para acionar um parafuso de potência de 40 mm tendo roscas quadradas (duplas) com passo de 6 mm. A porca deve se mover a uma velocidade de 48 mm/s, bem como mover uma carga de 10 kN. Os coeficientes de atrito são 0,10 (roscas do parafusos) e 0,15 para o colar, O diâmetro do colar é de 60 mm.

*\*Escolher o passo (com diâmetro) na Tabelas (Sistema métrico ou unificado, se o passo não fornecido).*



# Solução:

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi \mu d_m}{\pi d_m - \mu l} \right) \quad (5)$$

$$T_c = \frac{F \mu_c d_c}{2} \quad (9)$$

$$T = (5) + (9):$$

Determinar:

- a) avanço:  $l$
- b) diâmetro médio da rosca:  $d_m$

$$a) \text{ avanço } \rightarrow l = n \cdot p = 2 \cdot 6 = 12 \text{ mm}$$

$$b) \text{ diâmetro médio: } d_m = d - \frac{p}{2} = 40 - \frac{6}{2} = 37 \text{ mm}$$

Força (F)=10kN

Diâmetro do colar ( $d_c$ )=60mm

Coefficiente de atrito ( $\mu$ )=0,1

Coef. Atrito colar ( $\mu_c$ )=0,15

\*se o passo não for fornecido consultar Tabelas de rosca (Sistema métrico ou unificado,).



$$T_R = \frac{10000 \cdot 0,037}{2} \left[ \frac{0,012 + \pi \cdot 0,1 \cdot 0,037}{\pi \cdot 0,037 - 0,10 \cdot 0,012} \right] + \frac{10000 \cdot 0,15 \cdot 0,06}{2} = 83 \text{ N.m}$$

A potência necessária para acionar o parafusos será:

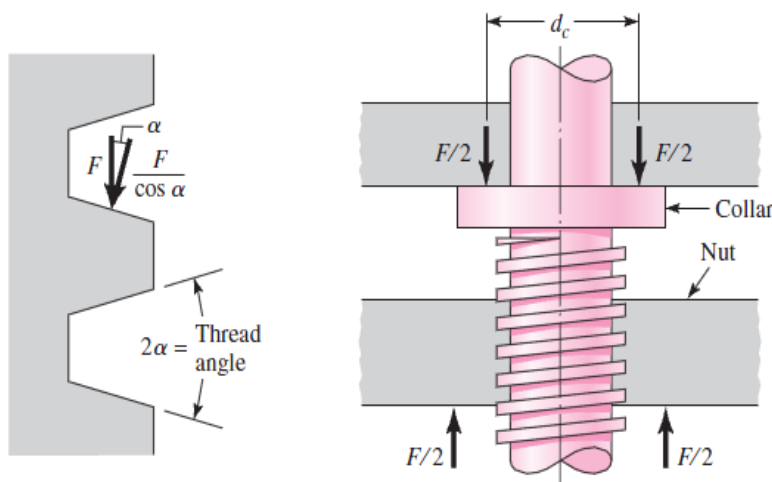
$$N = T \omega$$

Sendo:  $f = \frac{V}{l} = \frac{48}{12} = 4 \text{ rev/s}$

Onde:  $\omega = 2\pi f$   
 $\omega = 2\pi(4) = 8\pi \text{ rad/s}$

$$N = 83(8\pi) = 2086 \text{ W}$$

# Rosca ACME



$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi \mu d_m \sec \alpha}{\pi d_m - \mu l \sec \alpha} \right)$$

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi \mu d_m \sec \alpha}{\pi d_m - \mu l \sec \alpha} \right) + \frac{F \mu_c d_c}{2}$$

Força normal de rosca aumentada, pelo ângulo  $\alpha$   
(Shigley, 2004).

Com colar

## A. Condição de autotravamento do parafuso

Atrito baixo ou/e avanço muito grande!

$$\mu \geq \tan \lambda \cdot \cos \alpha$$

## B. Rendimento

$$\eta = \frac{T_0}{T_R} = \frac{Fl}{2\pi T_R}$$



# Materiais indicados para o par porca-parafuso:

- Garantir boa resistência à compressão, fadiga, ductibilidade e condutividade térmica.



**Parafusos:** aço de baixo carbono cementado;

**Porcas:** Bronze, Bronze-Chumbo, Bronze-Alumínio, Sinterizados (lubrificação).

**Fusos:** tratamento superficial!!

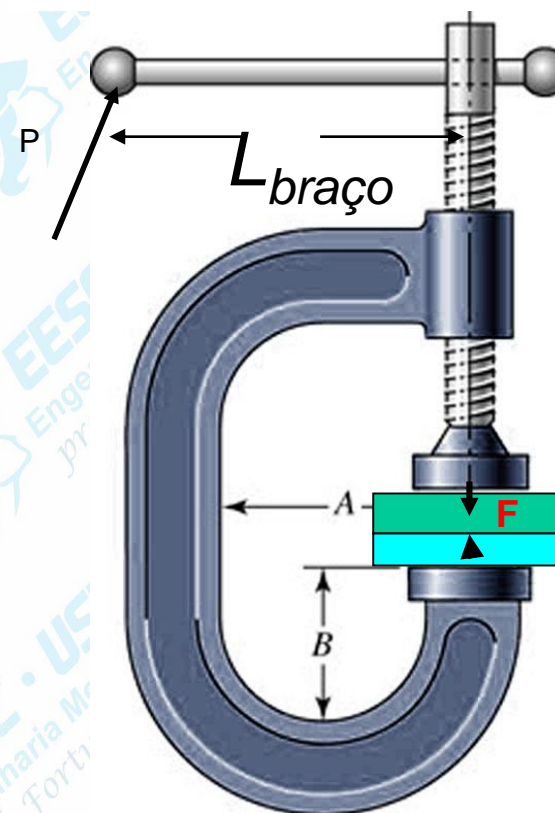
## Exercício 6.2 – Teórica

Dimensionar a força, o rendimento, e verificar a condição de auto retenção do grampo “C”.

### Exercício

Dado:

- ACME M16 x p=4mm
- $\mu = \mu_c = 0.15$
- $d_c = 11\text{mm}$
- $P = 30\text{ N}$
- $L_{\text{braço}} = 70\text{ mm}$





## Cálculo da Força

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi \mu d_m \sec \alpha}{\pi d_m - \mu l \sec \alpha} \right) + \frac{F \mu_c d_c}{2}$$

$$30.70 = \frac{F(16-2)}{2} \left( \frac{4 + \pi 0,15 \cdot 14 \cdot (\cos 14,5^\circ)^{-1}}{\pi 14 - 0,15 \cdot 4 \cdot (\cos 14,5^\circ)^{-1}} \right) + \frac{F 0,15 \cdot 11}{2}$$

$$N \cdot mm = \frac{F \cdot mm}{2} \left( \frac{mm + mm}{mm - mm} \right) + \frac{F \cdot mm}{2} \Rightarrow F = N$$

$$2100 = F \cdot 7 \cdot \left( \frac{4 + 6,8144}{43,9824 - 0,6197} \right) + F \cdot 0,825$$

$$2100 = F \cdot 1,7458 + F \cdot 0,825$$

$$F = 816N$$

## Rendimento

$$\eta = \frac{T_o}{T_R} = \frac{Fl}{2\pi T_R} =$$

$$\frac{810 \cdot 4}{2 \cdot \pi \cdot 2100} = 0,25$$

## Auto retenção

$$\mu \geq \tan \lambda \cdot \cos \alpha \Rightarrow 0,15 \geq \frac{l}{\pi d_m} \cdot \cos 14,5^\circ \Rightarrow$$

$$0,15 \geq \frac{4}{\pi \cdot 14} \cdot 0,9681 \Rightarrow 0,15 \geq 0,088 \Rightarrow OK!$$



**Exercício 6.3.** Determinar a potência de motor consumida pelo parafuso de potência para levantar o assento de clientes em consultório de dentista (300mm) utilizando parafuso de potência rosca de diâmetro nominal 20mm, duas entradas e passo de 3mm,  $d_m=18\text{mm}$  e comprimento de 180mm. Velocidade de subida  $v=6\text{ mm/s}$ .

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi \mu d_m \sec \alpha}{\pi d_m - \mu l \sec \alpha} \right) + M_a$$

Carga ( $P$ ) = ( $m_{\text{cliente}} + m_{\text{cadeira}}$ ) = (1500 + 300) N = 1800 N;

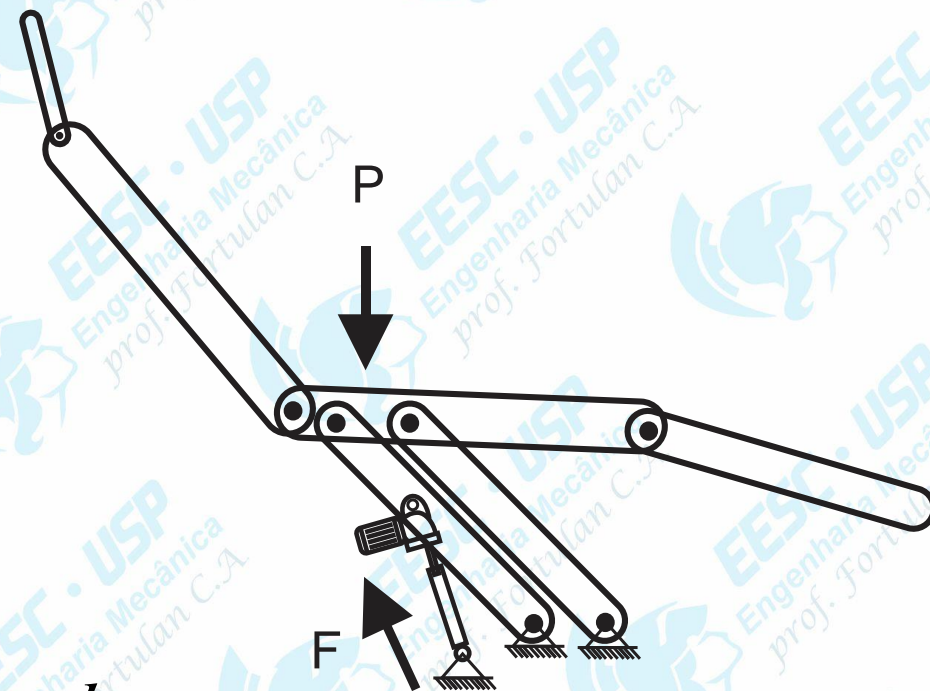
Considere a Força no fuso ( $F$ ) = 3000N;

Rolamentos: 01 contato angular ( $d_n$ ) = 30mm (P.1,7);

Coefficiente de atrito ( $\mu$ ) = 0,1;

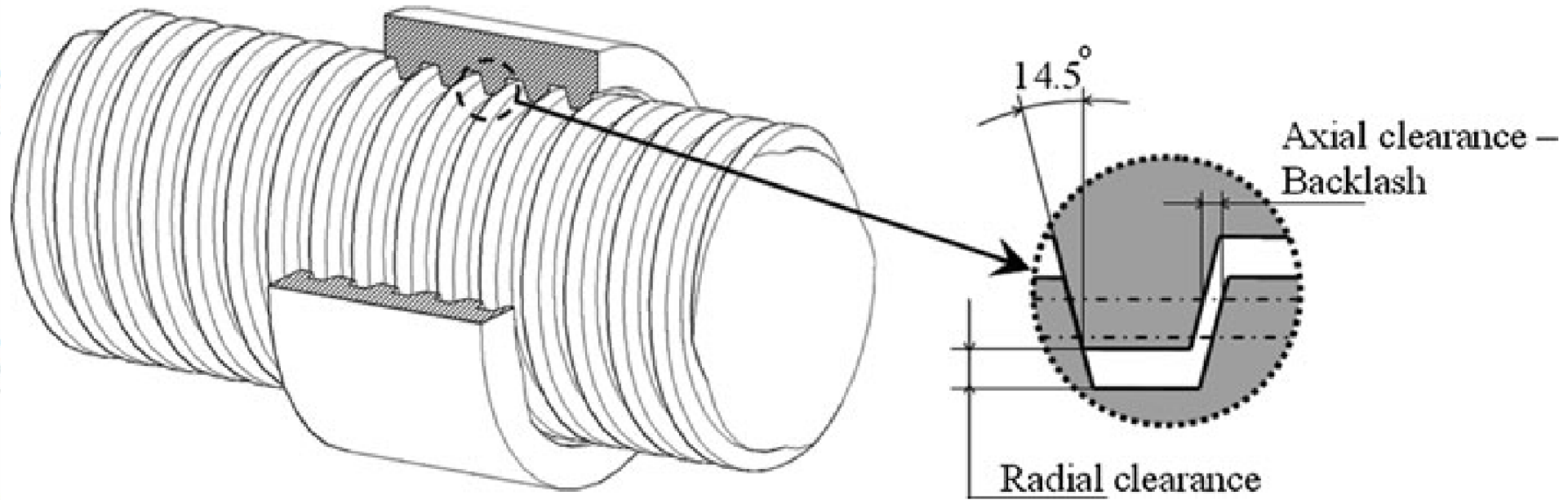
Coefficiente de atrito rolamento de contato angular: 0,002.

$$M_a = \mu \cdot P \cdot \frac{d}{2} \quad [\text{N}\cdot\text{mm}]$$





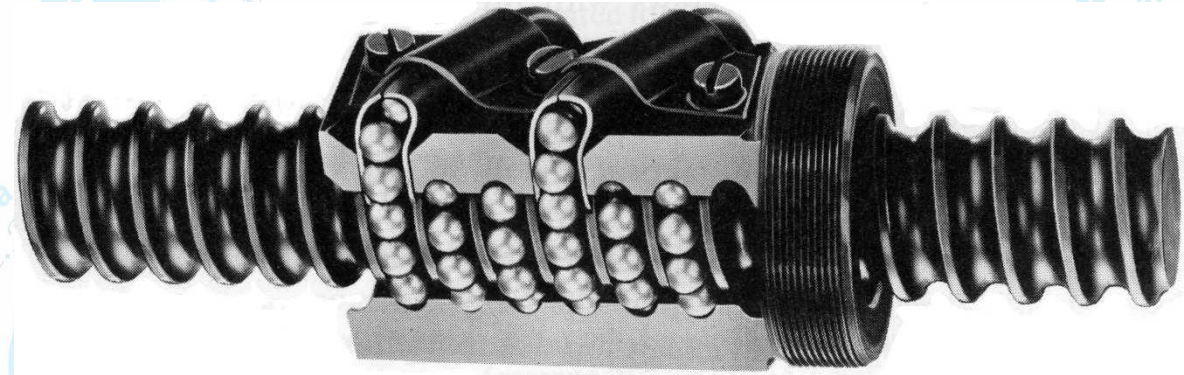
# Backlash





### 3. Fusos de esferas recirculantes

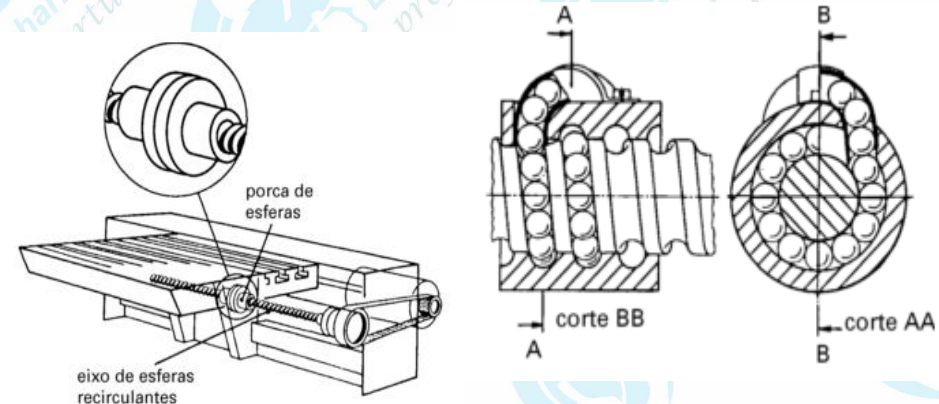
- baixa velocidade linear,
- boa precisão



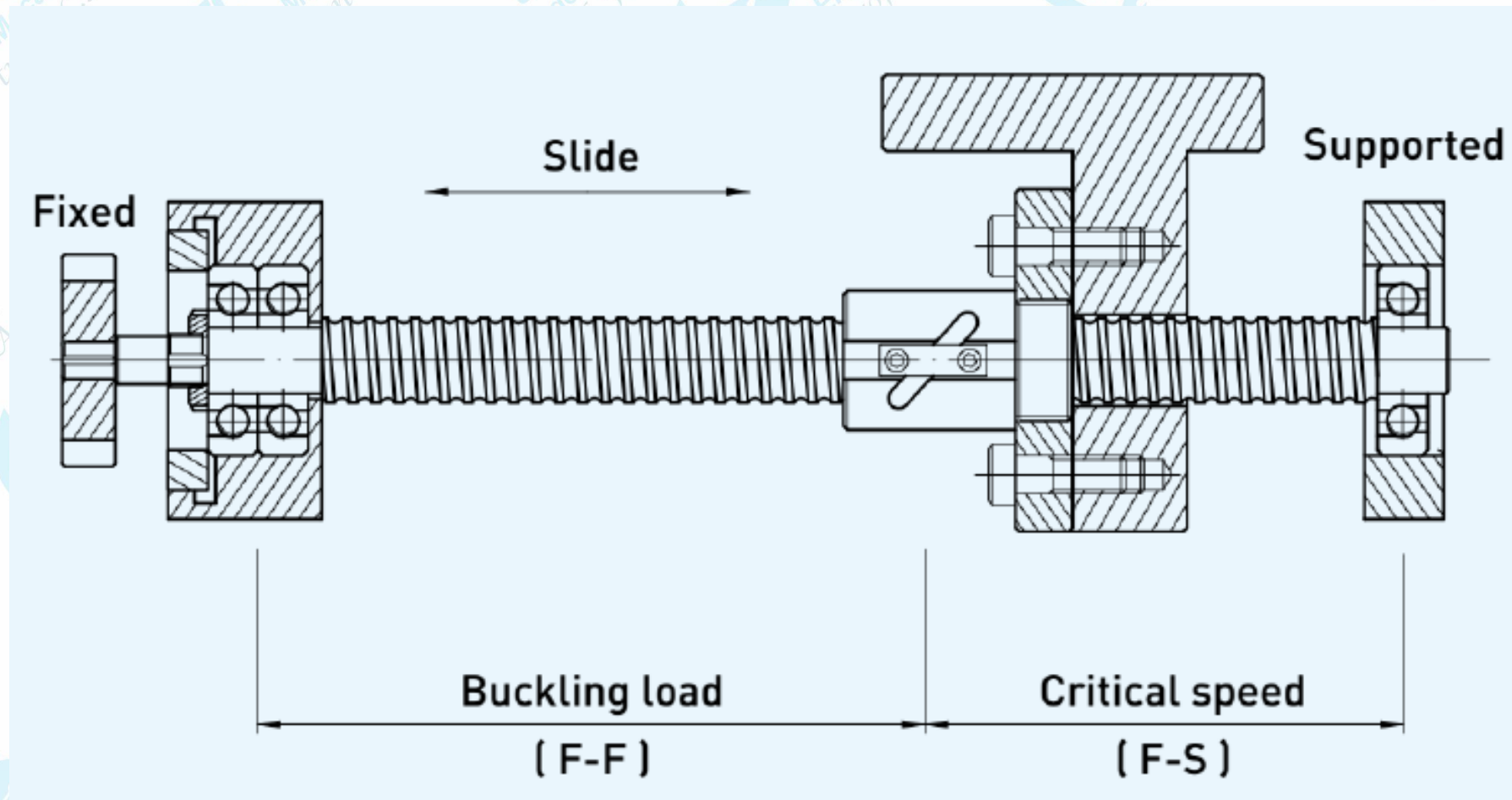
Acme Threads – ANSI B1.5, 1973

Butress Threads – ANSI B1.9-1973

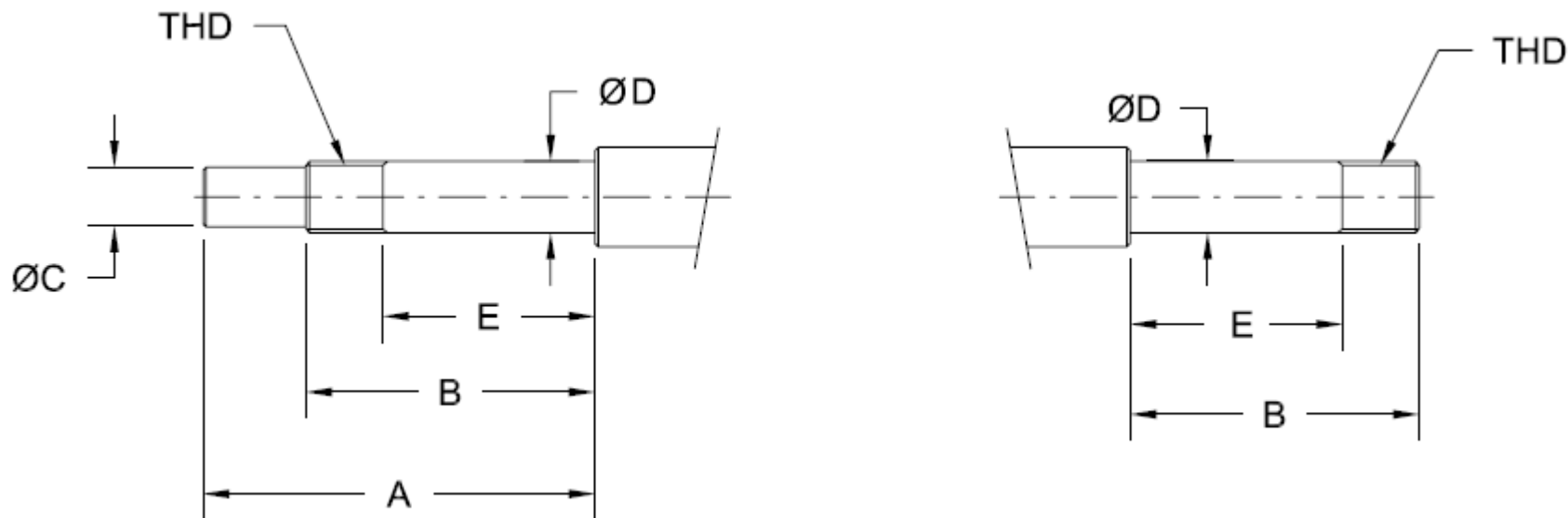
- **Fusos** – aço-carbono ou aço-liga.
- **Porcas e coroas** – bronze ou ferro fundido.
- **Fusos e porcas de esferas recirculares** – aço-liga.



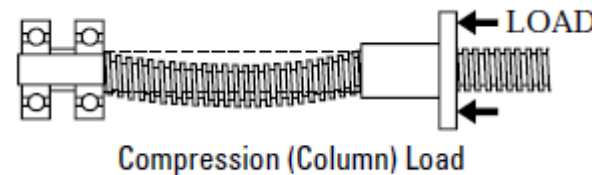
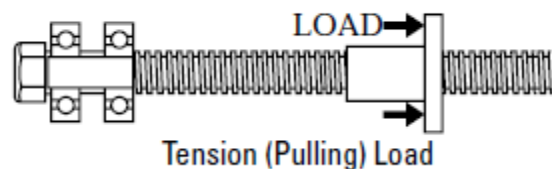




# Extremidades de fuso



Limites de tensões (tração e flambagem)





■ **Carga de flambagem do eixo**

Fator de acordo com o método de montagem

$\eta_2 = 20$  (consulte **15-38**)

Supondo que o método de montagem da seção entre a castanha e o mancal, onde a flambagem deve ser considerada, é "fixo-fixo:"

Distância entre as duas superfícies de montagem

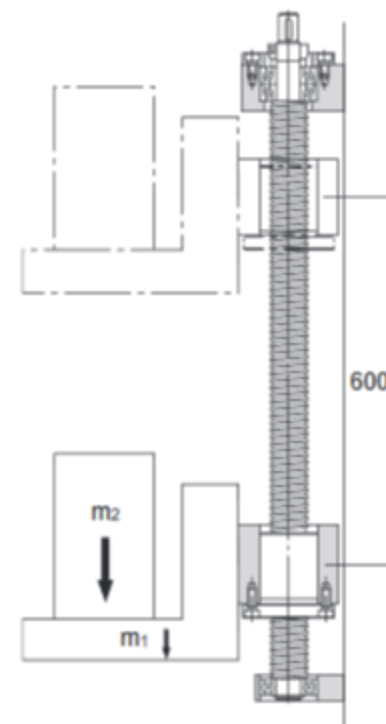
$\ell_s = 700$  mm (estimativa)

Diâmetro menor da rosca do eixo

$d_1 = 12,5$  mm

$$P_1 = \eta_2 \cdot \frac{d_1^4}{\ell_s^2} \times 10^4 = 20 \times \frac{12,5^4}{700^2} \times 10^4 = 9960 \text{ N}$$

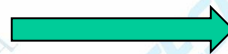
|                   |            |
|-------------------|------------|
| apoiado - apoiado | $f = 9,7$  |
| fixo - apoiado    | $f = 15,1$ |
| fixo - fixo       | $f = 21,9$ |
| fixo - livre      | $f = 3,4$  |



Precisão



rigidez



Pré-carga

### Principais cálculos e verificações:

- Velocidade crítica;
- Estimativa geométrica:  $D_m \times n$
- Estimativa da vida (revolução, horas e vida)
- Torque em velocidade constante (partida)

$$T_1 = (T_a + T_p + T_u) N_1/N_2$$



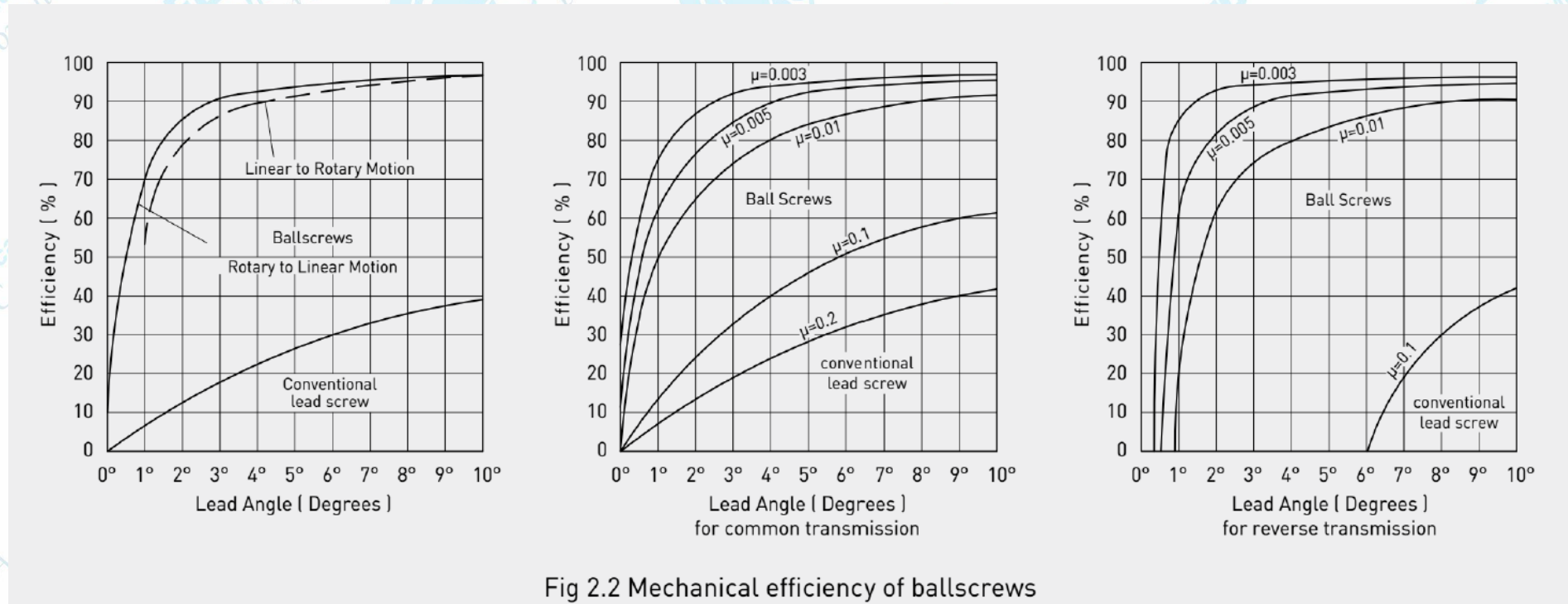
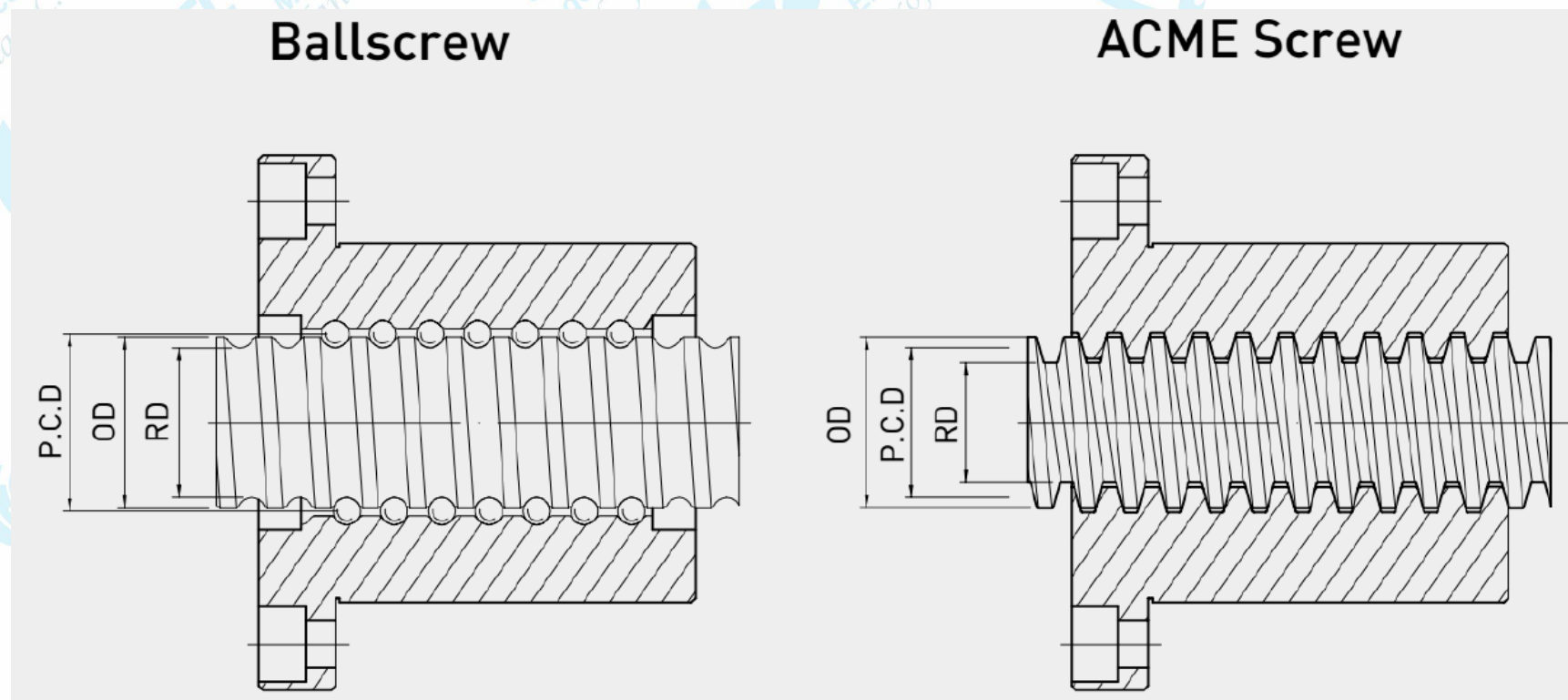


Fig 2.2 Mechanical efficiency of ballscrews

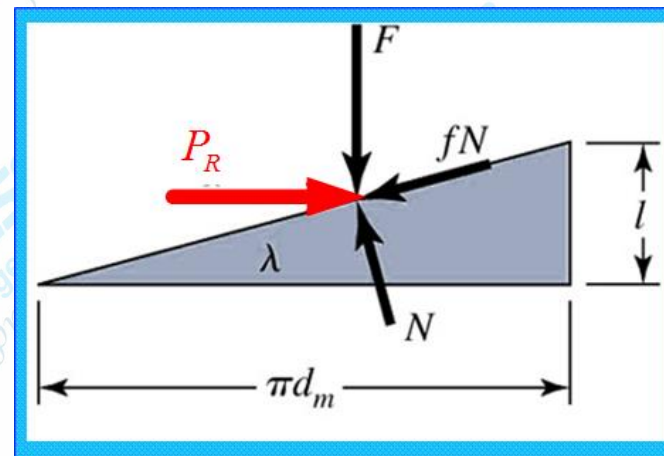
Hiwin- Ballscrew technical information



Hiwin- Ballscrew technical information



$$T_0 = \frac{Fl}{2\pi\eta_1} \quad (17)$$



Com pré carga

$$T_0 = K_p \frac{Fl}{2\pi}, \text{ onde } K_p = \text{coeficiente de pré-carga } \alpha \quad (18)$$

$$K_p = \frac{0,05}{\sqrt{\tan \alpha}} \quad (19)$$

Eficiência

$$\text{Re ndimento} = \eta = \frac{T_0}{T_R} = \frac{Fl}{2\pi T_R} \quad (20)$$

## Para transmissão direta – conversão de torque em avanço

$$\eta_1 = \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} = \frac{1 - \mu \tan \alpha}{1 + \mu / \tan \alpha}$$

## Para transmissão reversa – conversão de avanço em torque

$$\eta_2 = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha)} = \frac{1 - \mu / \tan \alpha}{1 + \mu \tan \alpha}$$

$\alpha$  = ângulo de avanço

$\beta$  = ângulo de atrito (0,17°-0,57°)

$D_m$  = diâmetro primitivo

$\mu$  = coeficiente de atrito ~ (0,003-0,01)

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{\pi D_m}$$

$$\beta = \tan^{-1} \mu$$

$\eta_1, \eta_2$  = rendimento mecânico = 0,9 – 0,95



# Exercício 6.4 – Refaça o Exercício 01 com parafusos de esfera

Repita utilizando um parafuso de esferas.  $D_m=37\text{mm}$

$\mu=0,005$

$M= 0,8 \text{ N.m} \rightarrow 2 \text{ rolamentos de contato angular } d=35\text{mm}$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{\pi D_m} \Rightarrow \tan^{-1} \frac{12}{\pi 37} = 5,9^\circ$$

$$\beta = \tan^{-1} \mu = \tan^{-1} 0,005 = 0,2865$$

$$T_0 = \frac{Fl}{2\pi\eta_1} = \frac{10000 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 0,95} = 20,1 N.m$$

$$\eta_1 = \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} = \frac{1 - \mu \tan \alpha}{1 + \mu / \tan \alpha}$$

$$T = T_0 + M = 20,1 + 0,8 + 20,9 N.m$$

$$\eta_1 = \frac{1 - 0,005 \tan 5,9}{1 + 0,005 / \tan 5,9} = 0,95$$

$$N = 20,9(8\pi) = 525W$$



# Informações Adicionais

Guias Lineares, servos

[www.velmex.com](http://www.velmex.com)

[www.compumotor.com](http://www.compumotor.com)

[www.thk.com](http://www.thk.com)

[www.3dcontentcentral.com/default.aspx](http://www.3dcontentcentral.com/default.aspx)

Anéis o´rings e retentores

[www.simrit.com](http://www.simrit.com)

[www.sabo.com](http://www.sabo.com)

Vídeos:

<https://www.youtube.com/watch?v=SLXX4kHNp5s>

<https://www.youtube.com/watch?v=T5hmCRnEvGI>

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

<https://www.youtube.com/watch?v=BVjUDkD29qo>

<https://www.youtube.com/watch?v=ZznFDzjqEi8>

# Bibliografia

- Alexander H. Slocum. Precision Machine Design.
- Hiwin- Ballscrew technical information .
- Shigley JE, Projeto de engenharia mecânica, Ed. Bookman, 7ed, 2005.



**Tabela 8-1 (ISO Sistema Métrico) Parafusos de potência p388**

| Diâmetro maior nominal $d$ | Série de passo grosso |                                |                              | Série de passo fino |                                |                              |
|----------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|
|                            | Passo $p$             | Área de tensão de tração $A_t$ | Área do diâmetro menor $A_r$ | Passo $p$           | Área de tensão de tração $A_t$ | Área do diâmetro menor $A_r$ |
| 1,6                        | 0,35                  | 1,27                           | 1,07                         |                     |                                |                              |
| 2                          | 0,40                  | 2,07                           | 1,79                         |                     |                                |                              |
| 2,5                        | 0,45                  | 3,39                           | 2,98                         |                     |                                |                              |
| 3                          | 0,5                   | 5,03                           | 4,47                         |                     |                                |                              |
| 3,5                        | 0,6                   | 6,78                           | 6,00                         |                     |                                |                              |
| 4                          | 0,7                   | 8,78                           | 7,75                         |                     |                                |                              |
| 5                          | 0,8                   | 14,2                           | 12,7                         |                     |                                |                              |
| 6                          | 1                     | 20,1                           | 17,9                         |                     |                                |                              |
| 8                          | 1,25                  | 36,6                           | 32,8                         | 1                   | 39,2                           | 36,0                         |
| 10                         | 1,5                   | 58,0                           | 52,3                         | 1,25                | 61,2                           | 56,3                         |
| 12                         | 1,75                  | 84,3                           | 76,3                         | 1,25                | 92,1                           | 86,0                         |
| 14                         | 2                     | 115                            | 104                          | 1,5                 | 125                            | 116                          |
| 16                         | 2                     | 157                            | 144                          | 1,5                 | 167                            | 157                          |
| 20                         | 2,5                   | 245                            | 225                          | 1,5                 | 272                            | 259                          |
| 24                         | 3                     | 353                            | 324                          | 2                   | 384                            | 365                          |
| 30                         | 3,5                   | 561                            | 519                          | 2                   | 621                            | 596                          |
| 36                         | 4                     | 817                            | 759                          | 2                   | 915                            | 884                          |
| 42                         | 4,5                   | 1120                           | 1050                         | 2                   | 1260                           | 1230                         |
| 48                         | 5                     | 1470                           | 1380                         | 2                   | 1670                           | 1630                         |
| 56                         | 5,5                   | 2030                           | 1910                         | 2                   | 2300                           | 2250                         |
| 64                         | 6                     | 2680                           | 2520                         | 2                   | 3030                           | 2980                         |
| 72                         | 6                     | 3460                           | 3280                         | 2                   | 3860                           | 3800                         |
| 80                         | 6                     | 4340                           | 4140                         | 1,5                 | 4850                           | 4800                         |
| 90                         | 6                     | 5590                           | 5360                         | 2                   | 6100                           | 6020                         |
| 100                        | 6                     | 6990                           | 6740                         | 2                   | 7560                           | 7470                         |
| 110                        |                       |                                |                              | 2                   | 9180                           | 9080                         |

\* As equações e os dados usados para desenvolver esta tabela foram obtidos da ANSI B1.1-1974 e B18.3.1-1978. O diâmetro menor foi contratado a partir da equação  $d_r = d - 1,226869p$ , e o diâmetro de passo, a partir de  $d_p = d - 0,649519p$ . A média do diâmetro de passo e do diâmetro menor foi usada para computar a área de tensão de tração.



**Tabela 8-2 (Roscas unificadas) \* Shigley - pág. 389**

| Designação do tamanho | Diâmetro maior nominal in | Série grossa - UNC    |   |  | Série fina - UNF      |   |  |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---|--|-----------------------|---|--|
|                       |                           | Roscas por polegada N | Áreas de tensão de tração $A_t$ , in <sup>2</sup> | Área do diâmetro menor $A_r$ , in <sup>2</sup> | Roscas por polegada N | Áreas de tensão de tração $A_t$ , in <sup>2</sup> | Área do diâmetro menor $A_r$ , in <sup>2</sup> |
| 0                     | 0,0600                    |                       |   |  | 80                    | 0,001 80  | 0,001 51                                       |
| 1                     | 0,0730                    | 64                    | 0,002 63  | 0,002 18                                       | 72                    | 0,002 78  | 0,002 37                                       |
| 2                     | 0,0860                    | 56                    | 0,003 70  | 0,003 10                                       | 64                    | 0,003 94  | 0,003 39                                       |
| 3                     | 0,0990                    | 48                    | 0,004 87  | 0,004 06                                       | 56                    | 0,005 23  | 0,004 51                                       |
| 4                     | 0,1120                    | 40                    | 0,006 04  | 0,004 96                                       | 48                    | 0,006 61  | 0,005 66                                       |
| 5                     | 0,1250                    | 40                    | 0,007 96  | 0,006 72                                       | 44                    | 0,008 80  | 0,007 16                                       |
| 6                     | 0,1380                    | 32                    | 0,009 09  | 0,007 45                                       | 40                    | 0,010 15  | 0,008 74                                       |
| 8                     | 0,1640                    | 32                    | 0,014 0   | 0,011 96                                       | 36                    | 0,014 74  | 0,012 85                                       |
| 10                    | 0,1900                    | 24                    | 0,017 5   | 0,014 50                                       | 32                    | 0,020 0   | 0,017 5  |
| 12                    | 0,2160                    | 24                    | 0,024 2   | 0,020 6  | 28                    | 0,025 8   | 0,022 6  |
| $\frac{1}{4}$         | 0,2500                    | 20                    | 0,031 8   | 0,026 9  | 28                    | 0,036 4   | 0,032 6  |
| $\frac{5}{16}$        | 0,3125                    | 18                    | 0,052 4   | 0,045 4  | 24                    | 0,058 0   | 0,052 4  |
| $\frac{3}{8}$         | 0,3750                    | 16                    | 0,077 5   | 0,067 8  | 24                    | 0,087 8   | 0,080 9  |
| $\frac{7}{16}$        | 0,4375                    | 14                    | 0,106 3   | 0,093 3  | 20                    | 0,118 7   | 0,109 0  |
| $\frac{1}{2}$         | 0,5000                    | 13                    | 0,141 9   | 0,125 7  | 20                    | 0,159 9   | 0,148 6  |
| $\frac{9}{16}$        | 0,5625                    | 12                    | 0,182   | 0,162  | 18                    | 0,203   | 0,189  |
| $\frac{5}{8}$         | 0,6250                    | 11                    | 0,226   | 0,202  | 18                    | 0,256   | 0,240  |
| $\frac{3}{4}$         | 0,7500                    | 10                    | 0,334   | 0,302  | 16                    | 0,373   | 0,351  |
| $\frac{7}{8}$         | 0,8750                    | 9                     | 0,462   | 0,419  | 14                    | 0,509   | 0,480  |
| 1                     | 1,0000                    | 8                     | 0,606   | 0,551  | 12                    | 0,663   | 0,625  |
| $1\frac{1}{4}$        | 1,2500                    | 7                     | 0,969   | 0,890  | 12                    | 1,073   | 1,024  |
| $1\frac{1}{2}$        | 1,5000                    | 6                     | 1,405   | 1,294  | 12                    | 1,581   | 1,521  |

Esta tabela foi compilada a partir da ANSI B1.1-1974. O diâmetro menor foi encontrado a partir da equação  $d_r = d - 1,299\ 038p$ , e o diâmetro de passo, a partir da equação  $d_m = d - 0,649\ 519p$ . A média do diâmetro de passo e do diâmetro menor foi usada para computar a área de tensão de tração.



## B) Tabelas de pressão superficial (tensão de esmagamento) e coeficientes de atrito, para parafusos de potência (Shigley, 2004).

**Table 8-4**

Screw Bearing

 Pressure  $p_b$ 

 Source: H. A. Rothbart,  
*Mechanical Design and  
 Systems Handbook*, 2nd ed.,  
 McGraw-Hill, New York,  
 1985.

| Screw Material | Nut Material | Safe $p_b$ , psi | Notes     |
|----------------|--------------|------------------|-----------|
| Steel          | Bronze       | 2500–3500        | Low speed |
| Steel          | Bronze       | 1600–2500        | 10 fpm    |
|                | Cast iron    | 1800–2500        | 8 fpm     |
| Steel          | Bronze       | 800–1400         | 20–40 fpm |
|                | Cast iron    | 600–1000         | 20–40 fpm |
| Steel          | Bronze       | 150–240          | 50 fpm    |

**Table 8-5**

 Coefficients of Friction  $f$   
 for Threaded Pairs

 Source: H. A. Rothbart,  
*Mechanical Design and  
 Systems Handbook*, 2nd ed.,  
 McGraw-Hill, New York,  
 1985.

| Screw Material     | Nut Material |           |           |           |
|--------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
|                    | Steel        | Bronze    | Brass     | Cast Iron |
| Steel, dry         | 0.15–0.25    | 0.15–0.23 | 0.15–0.19 | 0.15–0.25 |
| Steel, machine oil | 0.11–0.17    | 0.10–0.16 | 0.10–0.15 | 0.11–0.17 |
| Bronze             | 0.08–0.12    | 0.04–0.06 | —         | 0.06–0.09 |

**Table 8-6**

 Thrust-Collar Friction  
 Coefficients

 Source: H. A. Rothbart,  
*Mechanical Design and  
 Systems Handbook*, 2nd ed.,  
 McGraw-Hill, New York,  
 1985.

| Combination             | Running | Starting |
|-------------------------|---------|----------|
| Soft steel on cast iron | 0.12    | 0.17     |
| Hard steel on cast iron | 0.09    | 0.15     |
| Soft steel on bronze    | 0.08    | 0.10     |
| Hard steel on bronze    | 0.06    | 0.08     |