

SEM 0347 – Projeto Mecânico

Aulas 6 e 7

Elementos de movimentação linear

Profa. Zilda de C. Silveira

São Carlos, abril de 2019.

A) Contexto de projeto de máquinas

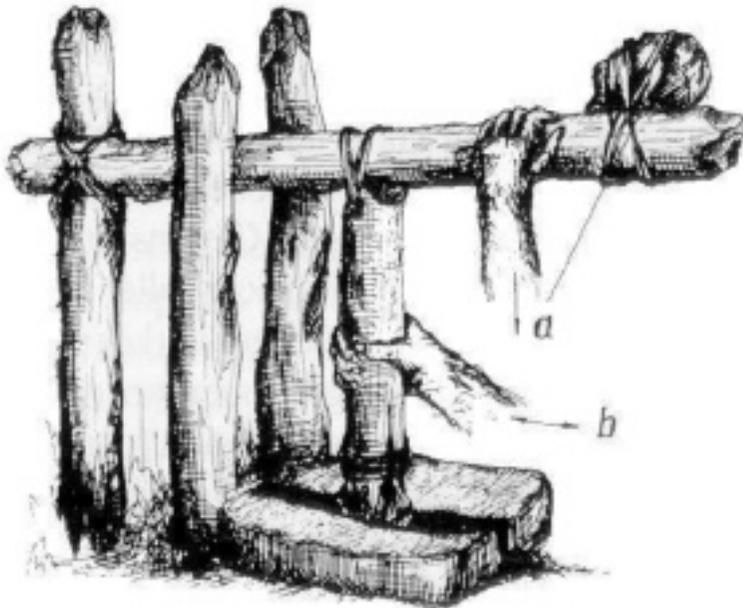


Figura A.1 – Plaina neolítica (Spur, 1979 *apud* Stoeterau, 2011)

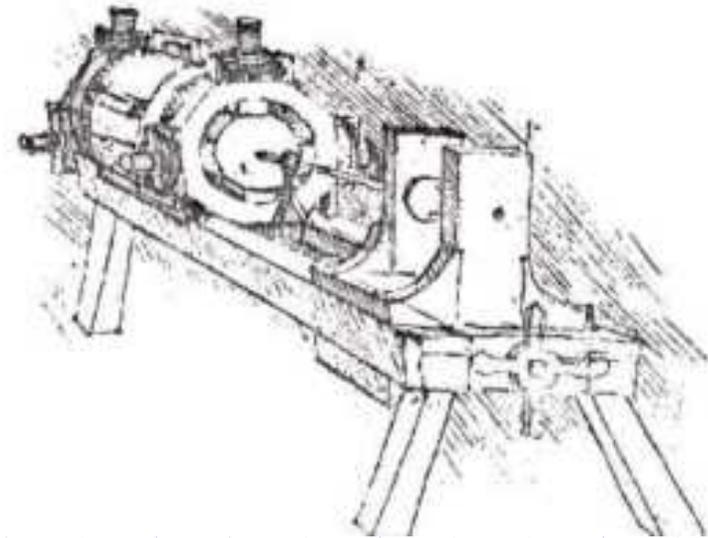


Figura A.2 – Furadeira com placa centrante – ensaio de Da Vinci (Spur, 1979 *apud* Stoeterau, 2011)

A) Contexto de projeto de máquinas

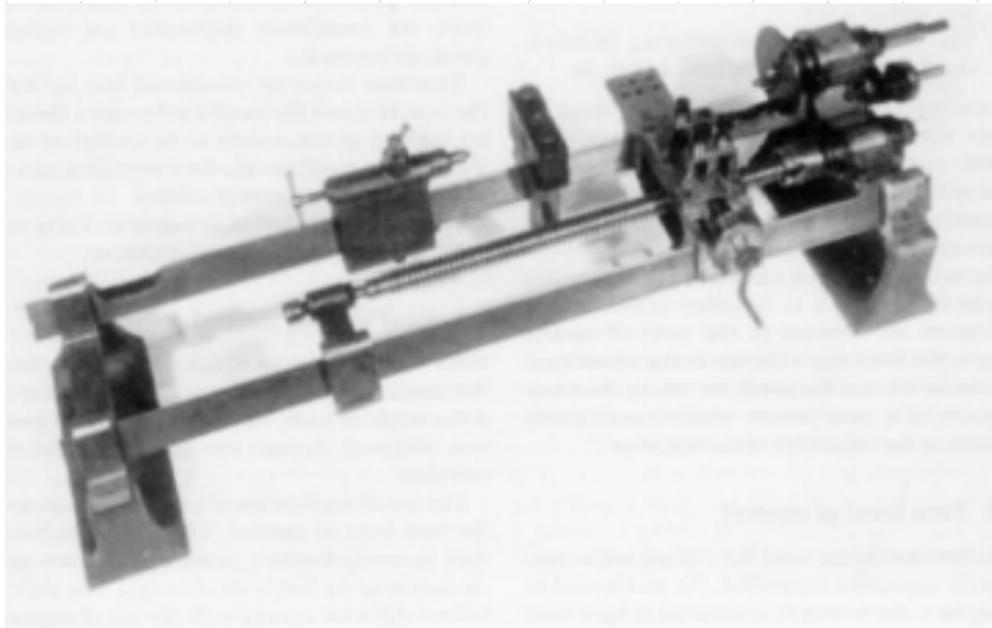


Figura A.3 – Torno de Maudslay – barramenta prismático paralelos em “V” Moore, 1978 *apud* Stoeterau, 2011)

FoFo/Madeira x Aço:
“Otimização”

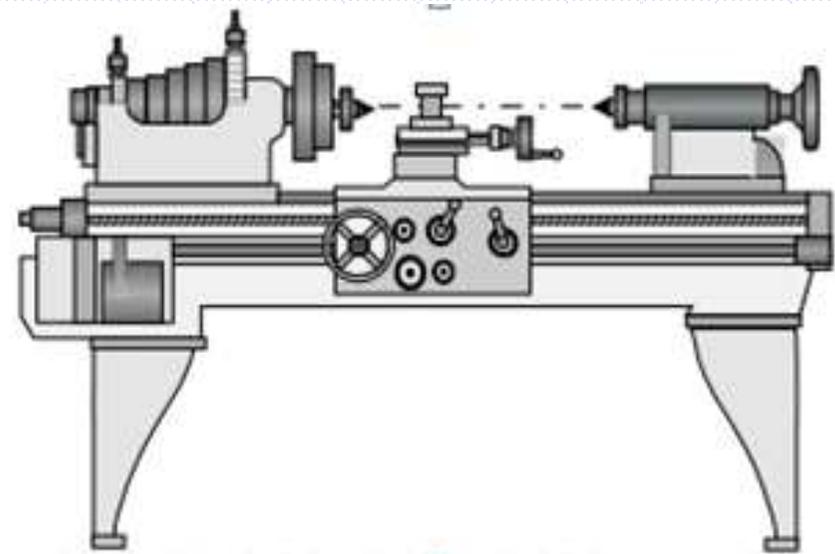


Figura A.4 – Torno universal – acionamento por correias-polias (Stoeterau, 2011)

A) Contexto de projeto de máquinas



Figura A.5 – Tendências do projeto de máquinas-ferramenta (Stoeterau, 2011)

- Posicionamento linear: 10 a 300 m/min (60 m/min.)

A) Contexto de projeto de máquinas

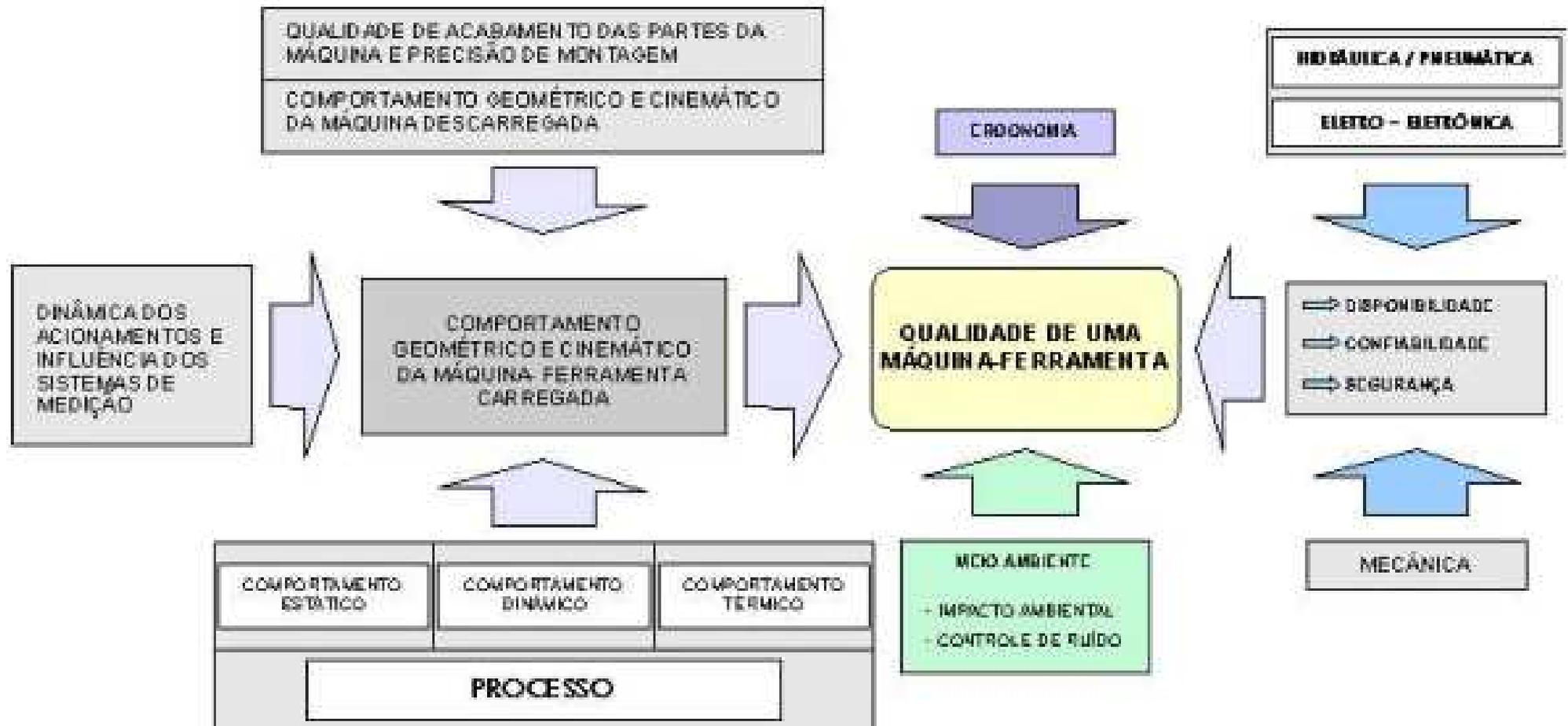


Figura A.6 – Relações que envolvem a qualidade de uma máquina-ferramenta (Weck, 1992 *apud* Stoeterau, 1999)

A) Contexto de projeto de máquinas

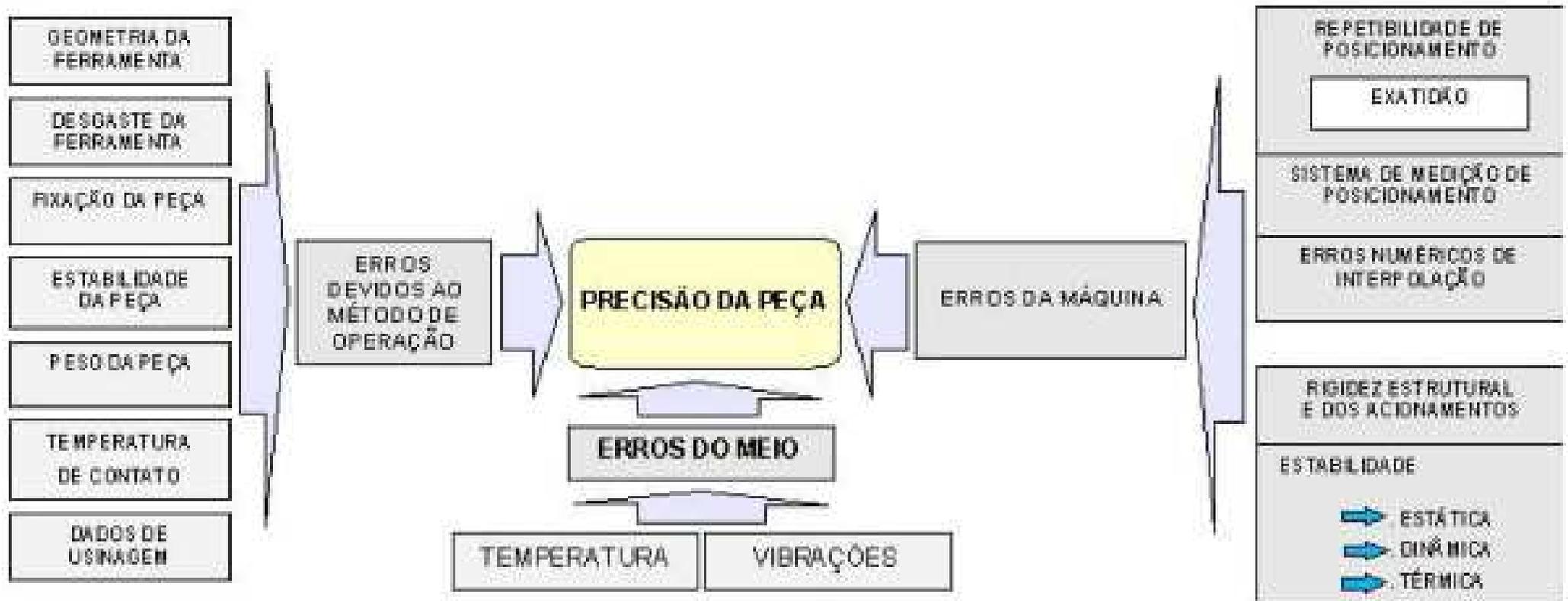


Figura A.7 – Relações que envolvem uma peça usinada e **prototipada!!!** (Weck, 1992 *apud* Stoeterau, 1999)

A) Contexto de projeto de máquinas

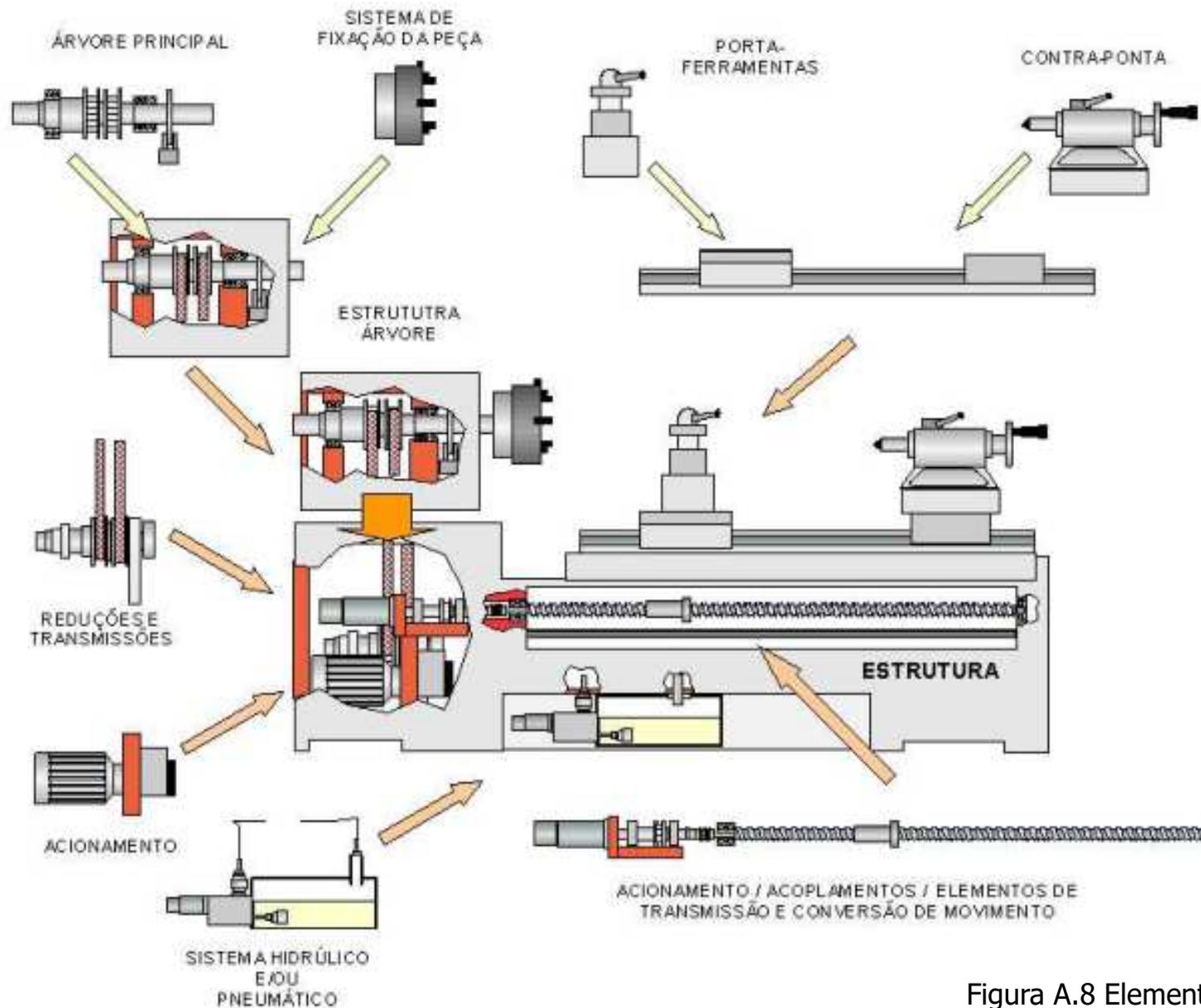


Figura A.8 Elementos básicos de um torno mecânico convencional (Stoeterau, 1999)

1. Subsistemas básicos para projeto mecânico

- ✓ Definição do volume de “trabalho”
- ✓ Projeto dos sistemas de acionamento e movimentação
- ✓ Projeto dos sistemas de suporte
- ✓ Projeto das uniões mecânicas (tipos – decisão de projeto)
- ✓ Projeto da estrutura e das uniões estruturais (solda, *snap fit*) – Balanço K e C, comportamento modal.
- ✓ Modelagem geométrica e projeto do acoplamento cinemático
- ✓ Métodos numéricos*

1.1 Considerações do projeto estrutural

- ✓ Projeto da estrutura e das uniões estruturais (solda, *snap fit*) – Balanço K e C, comportamento modal.
- ✓ Escolha do processo de fabricação: remoção de material, conformação, tecnologia do pós e MA*.
- ✓ Tratamento térmico (iterativo: matéria-prima (TT), usinagem, (TT),...)
- ✓ Montagem e manutenção dos subconjuntos e elementos mecânicos/eletrônicos internos).
- ✓ Amortecimento e Massa (fator de perda do material, decremento logarítmico, fator de amortecimento) – inserção de materiais visco elásticos.
- ✓ Propriedades térmicas (ambiente)
- ✓ Resistência à corrosão *.

1.1 Considerações do projeto estrutural

- **Rigidez (K):** Ação das cargas estáticas (peso da peça, esforços de usinagem,...) + **Vibrações decorrentes de forças inerciais e carregamentos dinâmicos** (deformação que se desenvolverá).

➤ *Rigidez estática*

Deformações (carregamentos flexo-torcionais) desalinhamento e deslocamentos dos elementos (precisão e repetibilidade):

- Peso das partes móveis,
- Peso das peças de trabalho
- Forças de usinagem*
- Gradientes térmicos
- Torques excessivos
- Nivelamento incorreto

Materiais para estruturas:

FoFo*

Aço - soldagem (1018...)

Granito sintético/cerâmica

Compósito

Concreto

1.2 Considerações sobre pré-dimensionamento das uniões mecânicas

- Itens que podem contribuir para confiabilidade reduzida em estruturas/montagens mecânicas

- Uniões aparafusadas (rigidez total e lateral, tensões compressivas, Pré-carga, dureza, estabilidade térmica)

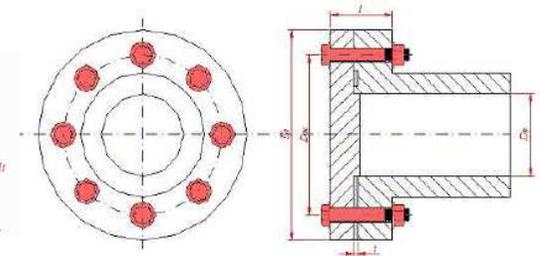
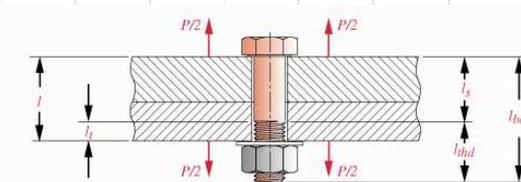


- Uniões coladas (Temperatura, resistência à fadiga)

- Uniões rebitadas

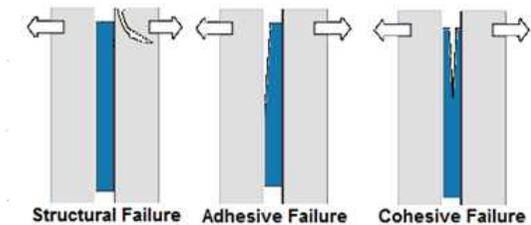
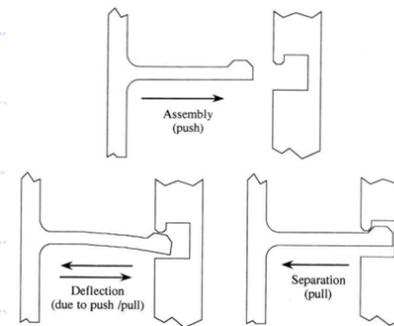


- Uniões de encaixe

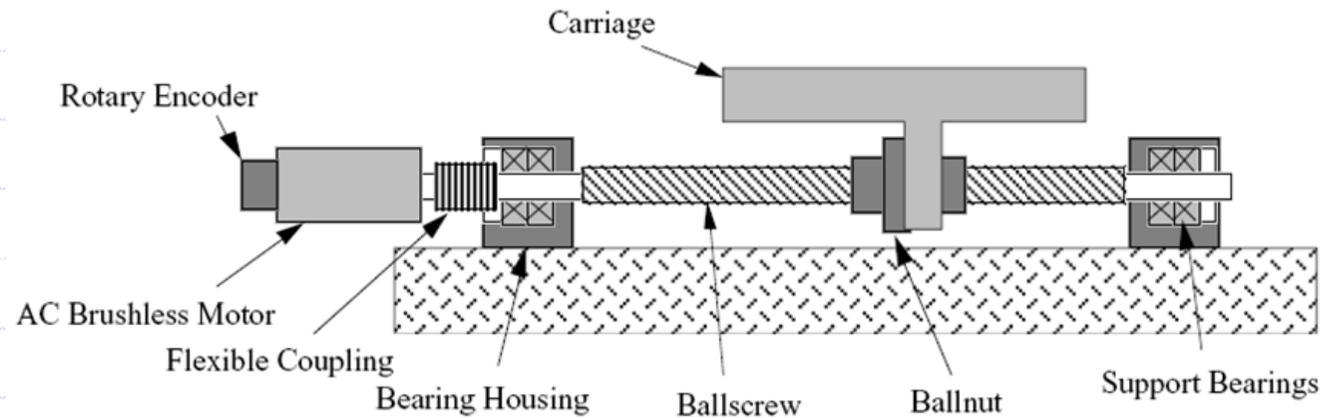


- Uniões soldadas

- Uniões por interferência*



2. Sistemas de acionamento em projeto de sistemas mecânicos



Fonte: Slocum, A.H. Precision Machine Design

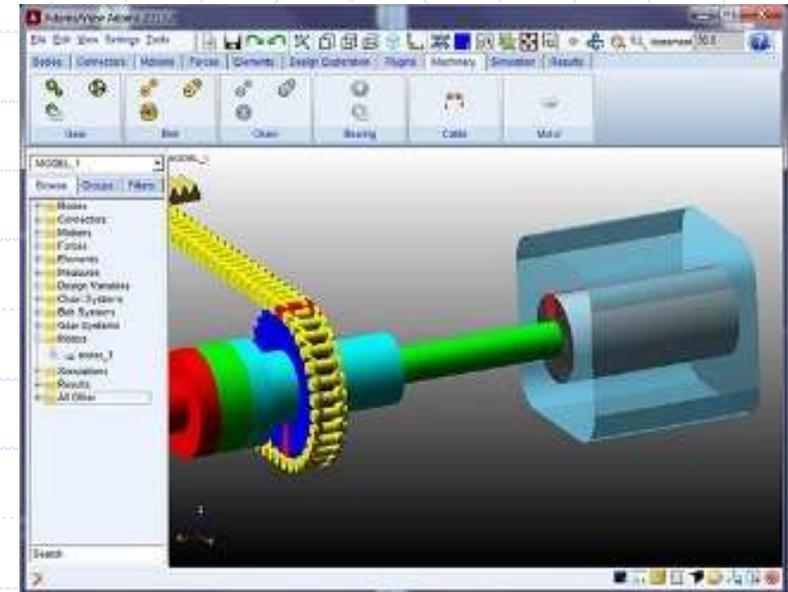


Forma da estrutura	Plana	Inclinada	Frontal	Coluna
Movimento relativo entre peça e ferramenta	Árvore paralela ao chão	Árvore perpendicular ao chão	Árvore perpendicular ao chão	Árvore com pivotagem ao plano do chão

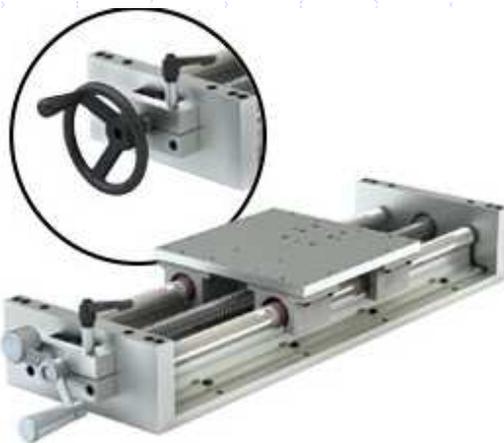
2. Sistemas de acionamento em projeto de sistemas mecânicos



<https://www.item24.de/en/productworld/automation.html>



<http://www.mscsoftware.com/product/adams-machinery>



Twin Round Shafts

Linear Motion Slide Actuators - Twin Round Shafts

SureMotion continuously-supported round rail slide with ball screw actuation provides a very robust precision linear motion. Units are complete except for a drive motor. (SureStep stepper motor is recommended.)

- High-accuracy ball screw
- Continuously-supported guide rails
- Hard-coated aluminum slides
- Replacement components available
- Ready for NEMA 23 motor

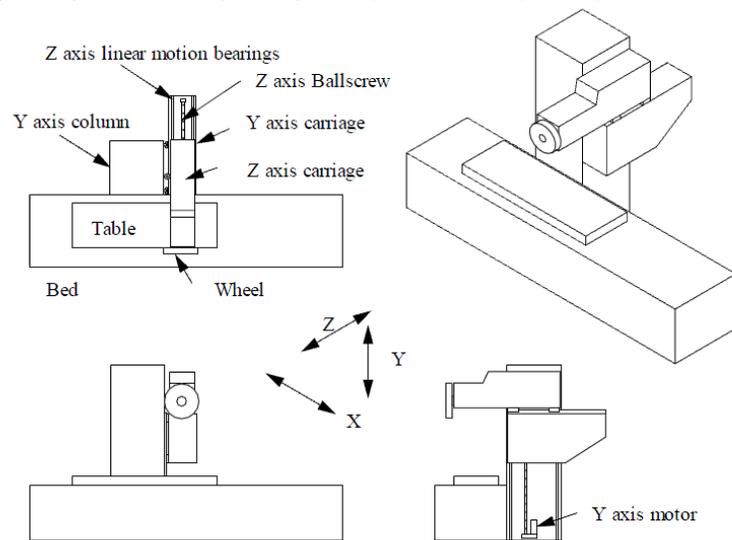
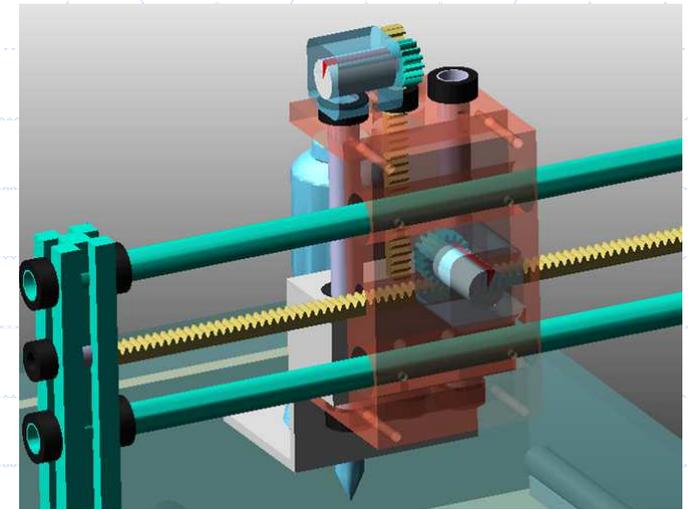
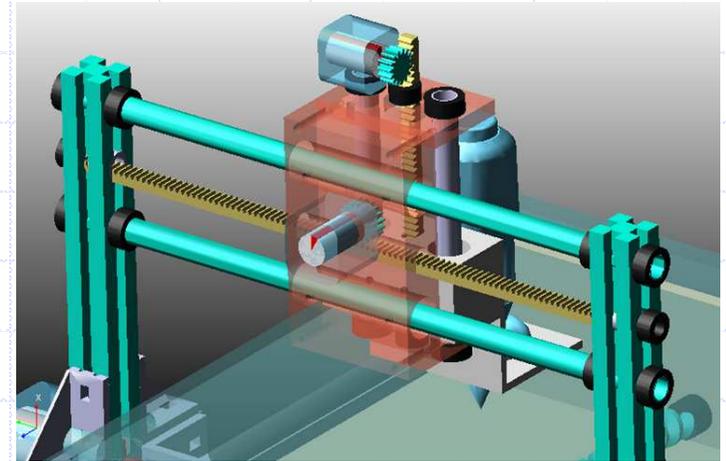
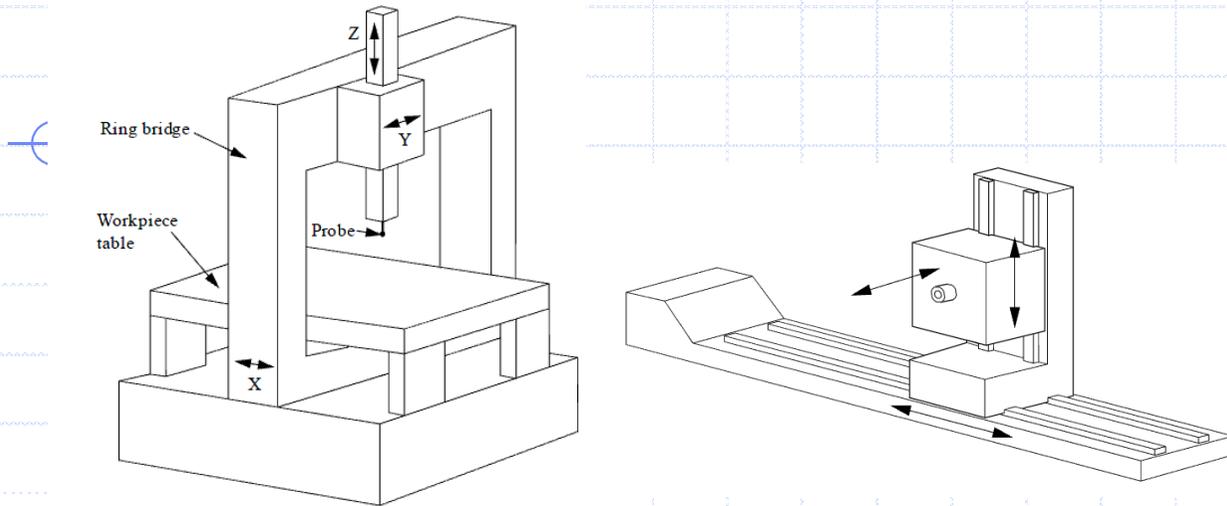
- Max load capacity: 920 lb.
- Max speed: 6 in/sec
- Travel: 12, 24 inches
- Applications: positioning systems, heavy loads

- Twin round shaft linear actuators start at **\$2,399.00** (LARS2-08T12BP2C)

[Shop Now](#)

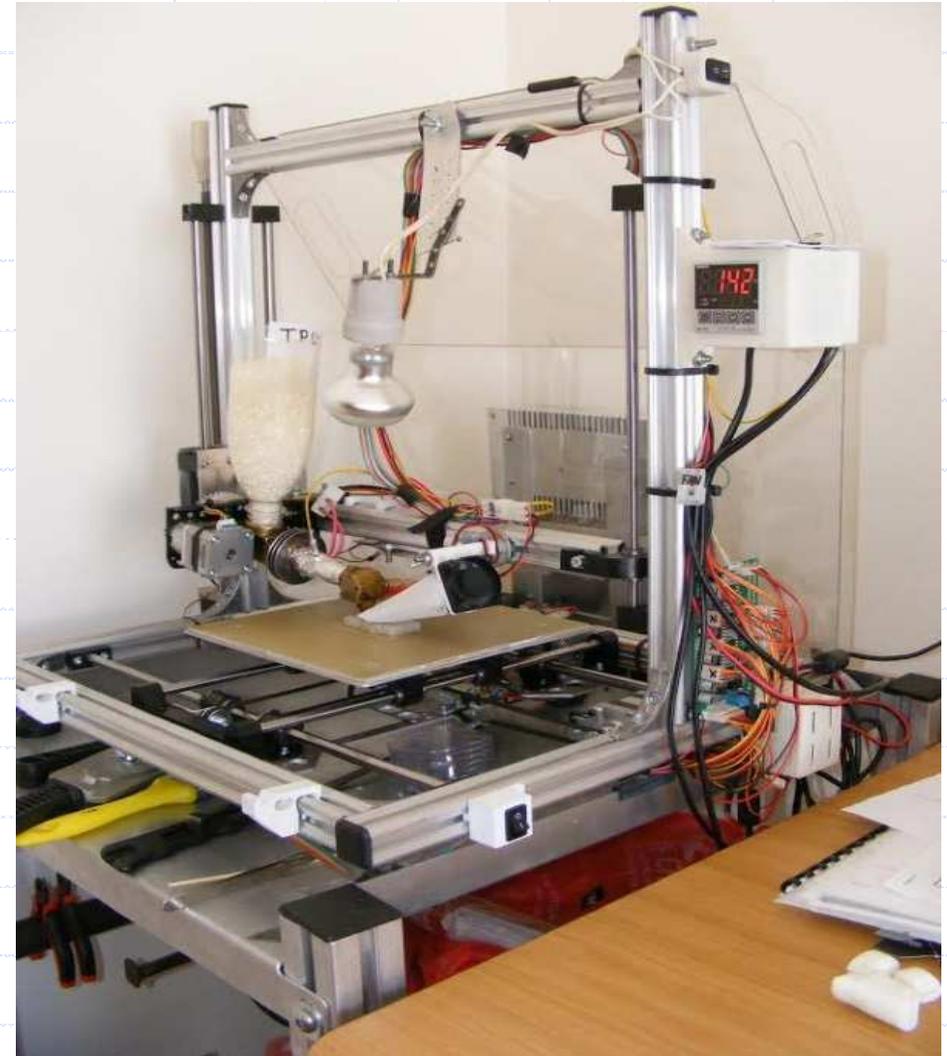
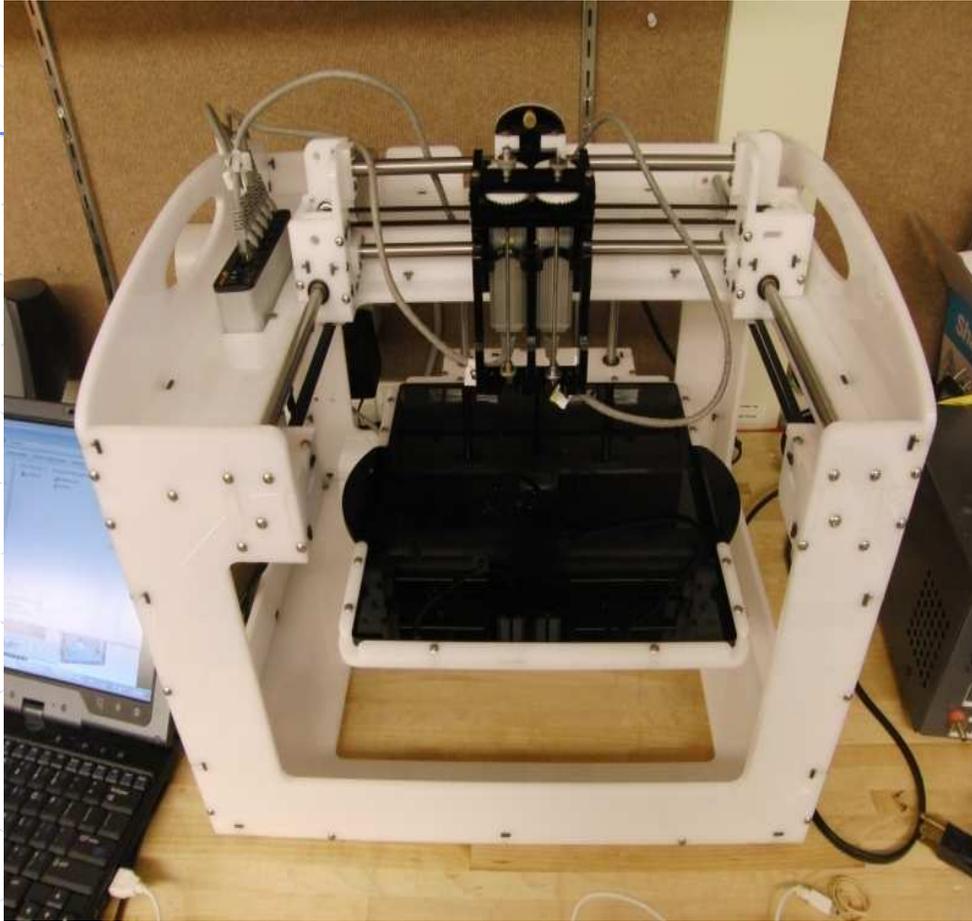
- [SureMotion Twin Round Shafts Linear Actuators Overview](#)

2. Sistemas de acionamento em projeto de sistemas mecânicos



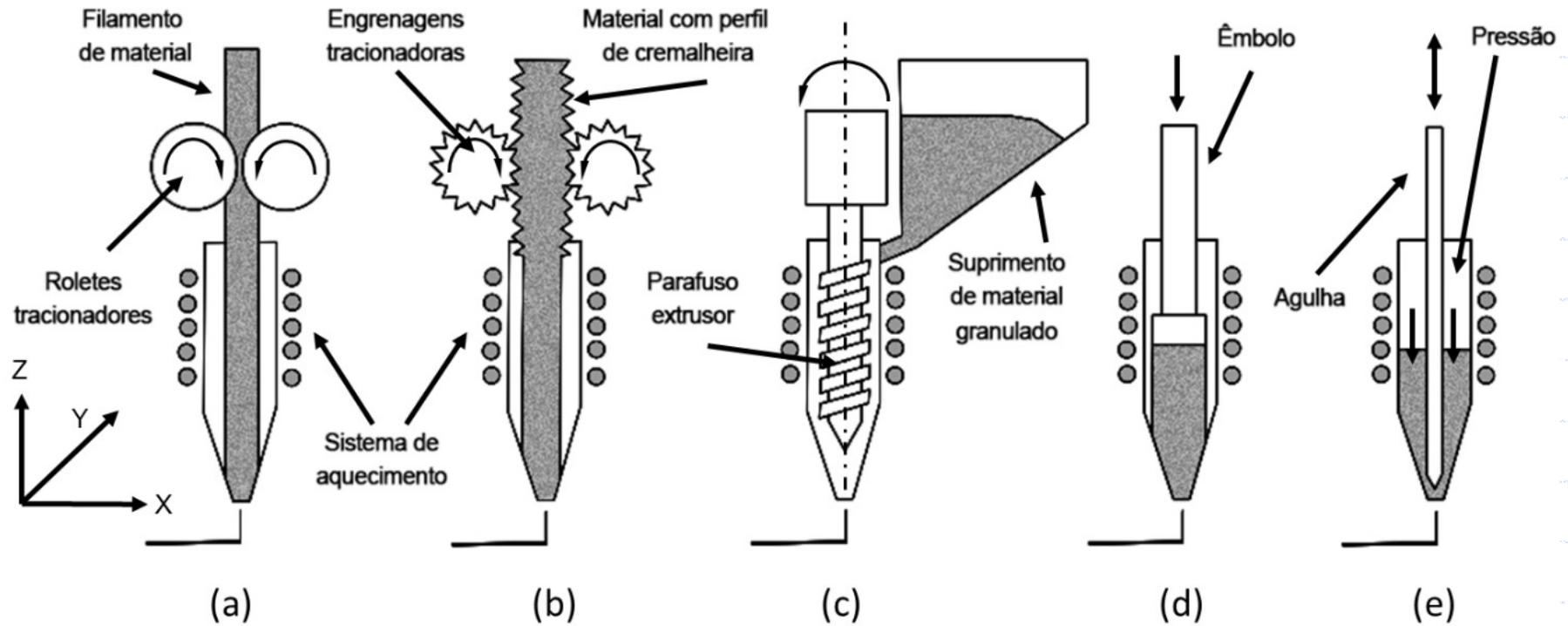
<http://www.mscsoftware.com/product/adams-machinery>

2. Sistemas de acionamento em projeto de sistemas mecânicos

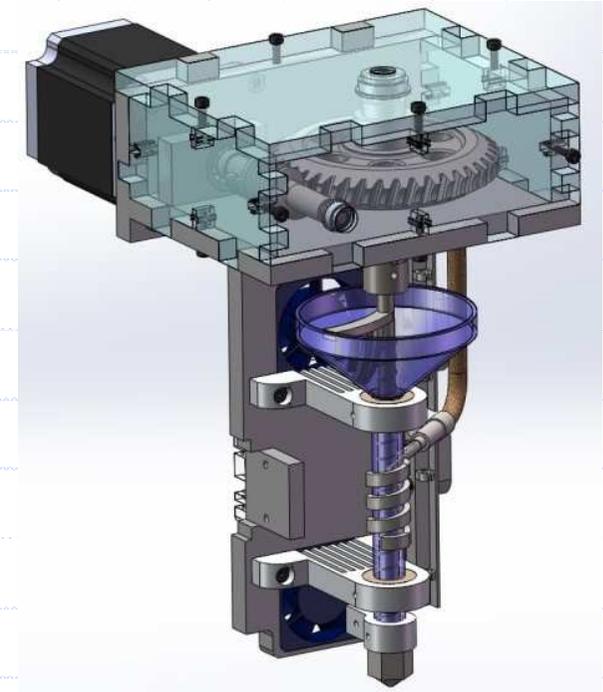
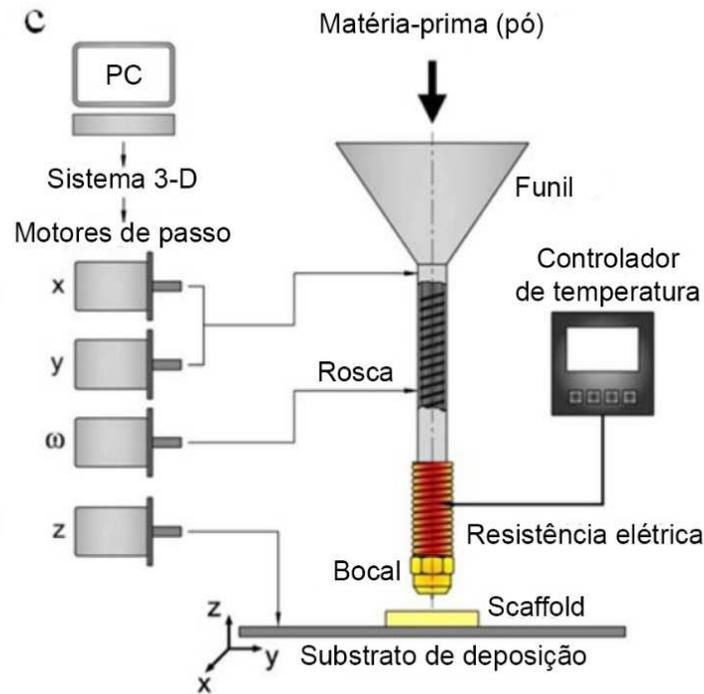
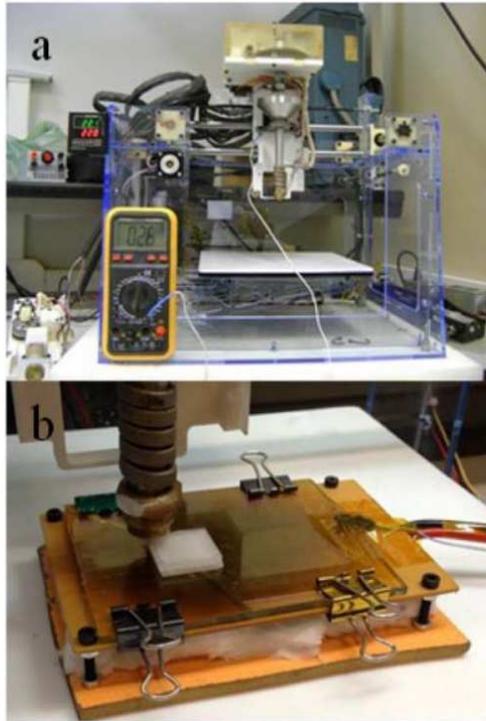


<http://www.3ders.org/articles/20150529-south-africa-fouche3dprinting-announces-new-waltruder-8-pellet-extruder.html>

2.1 Sistemas de acionamento: mecanismos para extrusão



2.1 Sistemas de acionamento: mecanismos para extrusão



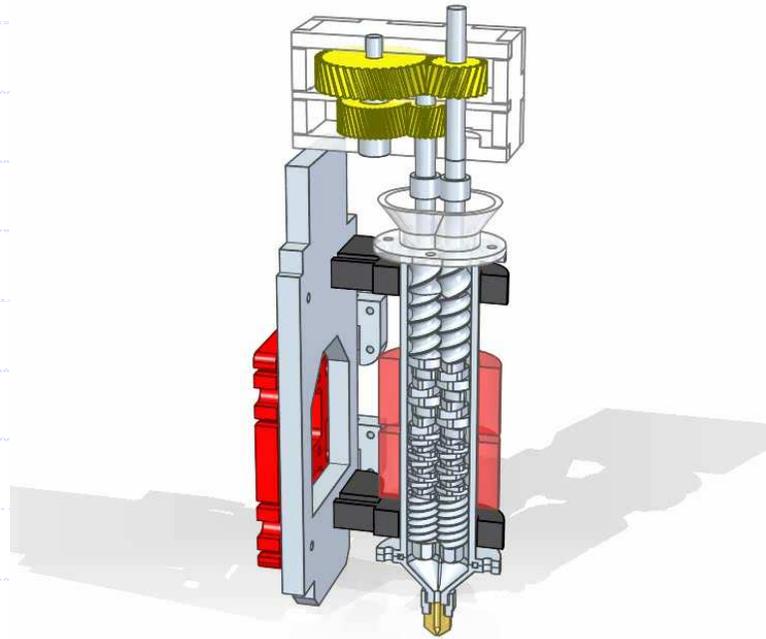
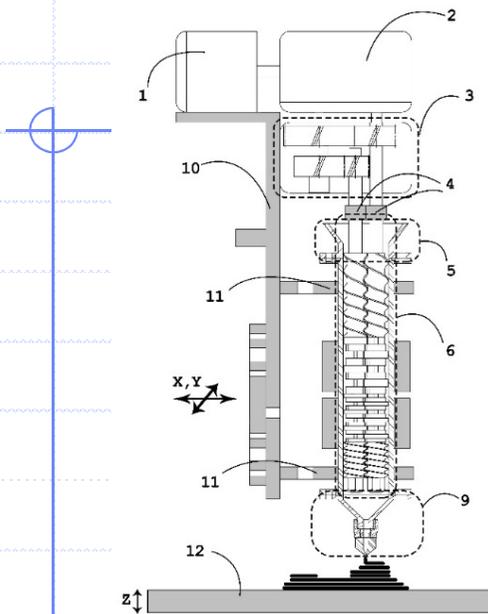
Status: protótipo técnico em uso/projeto em melhoria

Características: rosca simples, diâmetro variável, filete simples, passo constante, controle de temperatura e velocidade de rotação da rosca

Alimentação: material em pó (30 – 60g)

Experiências de uso: PA 12 (rejeito de SLS), PCL e PCL/ β -TCP (compósito polímero/cerâmica)

2.1 Sistemas de acionamento: mecanismos para extrusão



Status: projeto em finalização/fabricação do protótipo técnico;

Características: dupla rosca modular, diâmetro constante, filete duplo, passo variável, controle de temperatura, velocidade de rotação e componentes da rosca;

Alimentação: material em pó (0,2 kg/h);

Matéria-prima prevista (estado sob pó): PCL, PCL/ β -TCP (compósito polímero/cerâmica), PCL/PLA (blenda)

2.1 Sistemas de acionamento: mecanismos para extrusão

- ◆ Sensores eletrônicos: PCL + negro de fumo, ABS + grafeno (condução de eletricidade)
- ◆ Aleta guia de turbinas: Ultem 1000 + fibra de C picada (resistência a 200 °C – alta para polímeros)
- ◆ Dispositivos eletromagnéticos: ABS e PC + TiO₂ (maior cte. dielétrica)
- ◆ Aplicações aeroespaciais: PC + W (bloqueio de raios-X), ABS + nanofibras de ZnO (resist. degradação termomecânica)
- ◆ Aplicações em bioengenharia: PCL + β TCP (osteointegração)

2.2 Projeto do sistema de acionamento (geração de potência e transmissão)

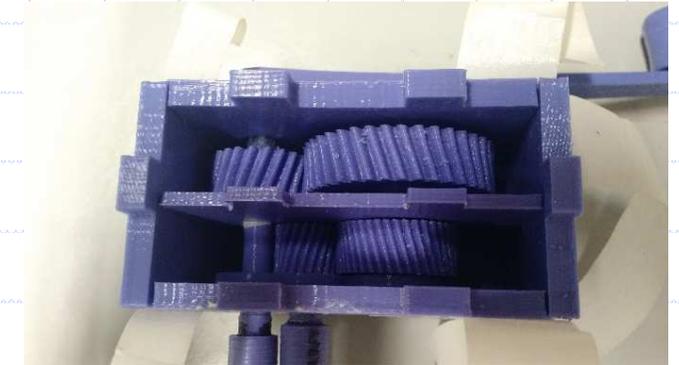
- ✓ Motores elétricos/eletrônicos, MCI, turbinas...
- ✓ Atuadores (mecânicos, eletromagnéticos, hidrostáticos, ...)
- ✓ Acoplamentos
- ✓ Sistemas de transmissão (redutores, amplificadores)
 - ✓ Rígidas e elementos flexíveis (movimento rotacional)
 - ✓ Falhas devido: atrito, histerese, *Backlash*, desalinhamento, erros de forma e de posição.

2.2 Projeto do sistema de acionamento (geração de potência e transmissão)

- ✓ Sistemas de transmissão (redutores, amplificadores)
 - ✓ Rígidas e elementos flexíveis (movimento rotacional)



2.2 Projeto do sistema de acionamento (geração de potência e transmissão)

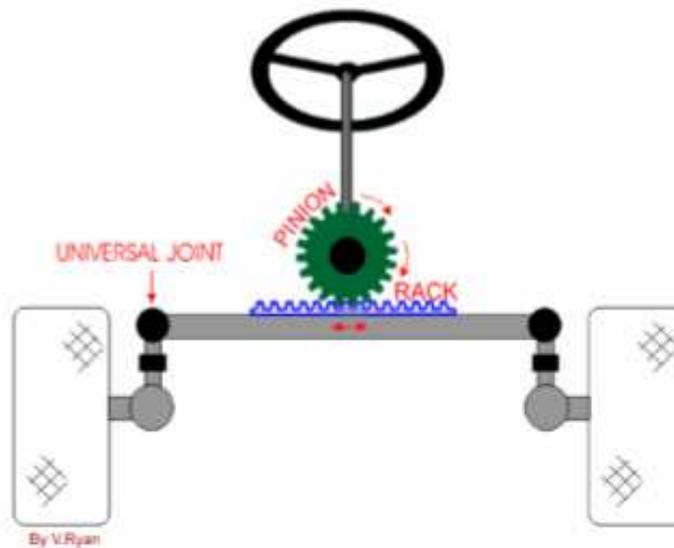


2.2 Projeto do sistema de acionamento (geração de potência e transmissão)

▪ Linear - rotacional

Pinion-rack driven (maiores trajetórias)

*Trajetória mais longa

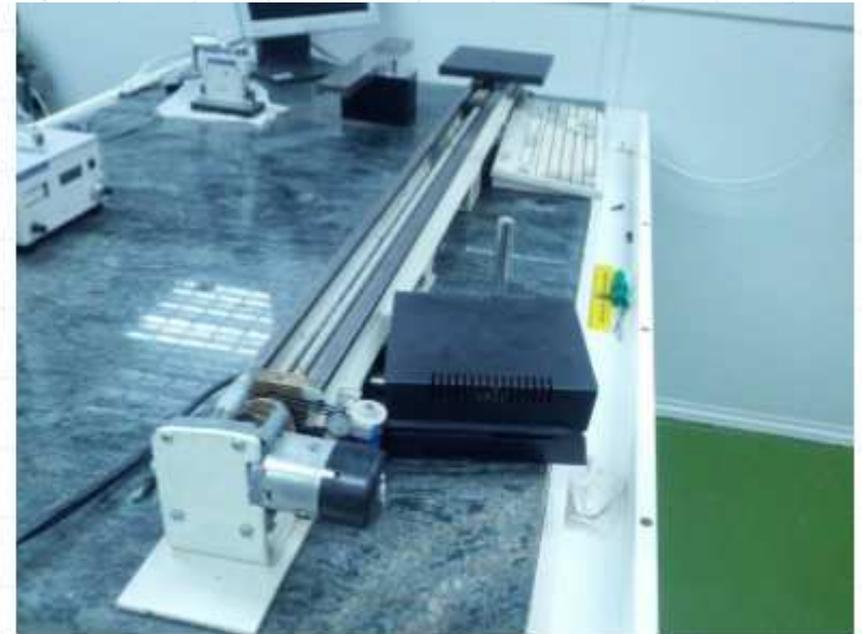


<http://www.technologystudent.com/gears1/rkpin4.htm>

2.2 Projeto do sistema de acionamento (geração de potência e transmissão)

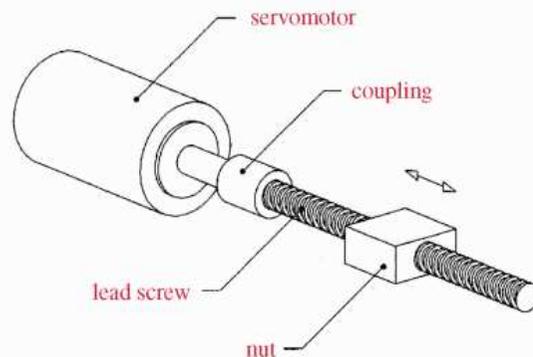
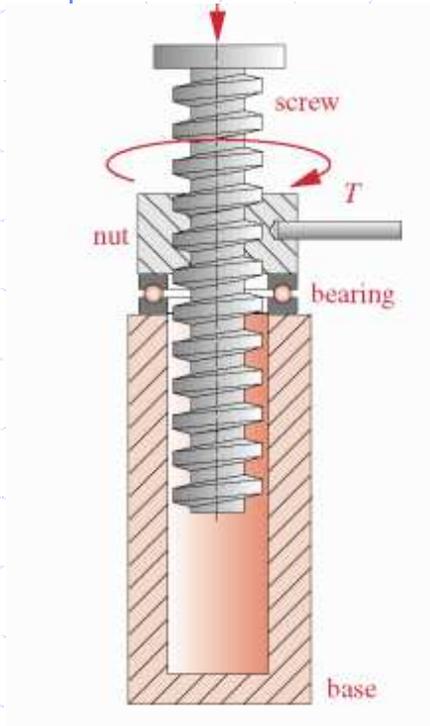
- **Linear - rotacional**

Leadscrew - Ballscrew



2.2.1 Definições de Fusos de movimentação (*leadscrew, powerscrew*)

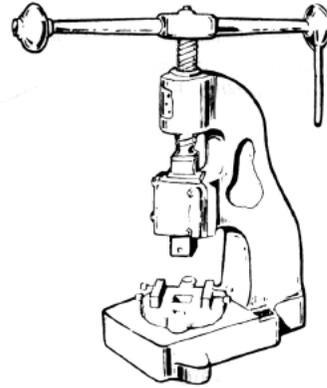
✓ Dispositivos utilizados para converter movimento de rotação (porca ou parafuso) em um movimento relativamente lento, componente acoplado ao eixo do parafuso.



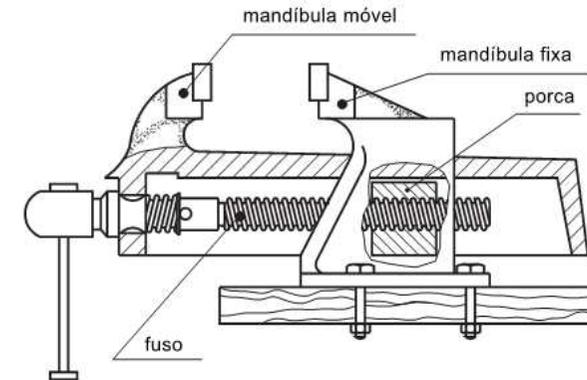
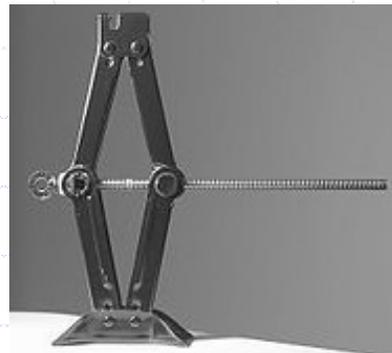
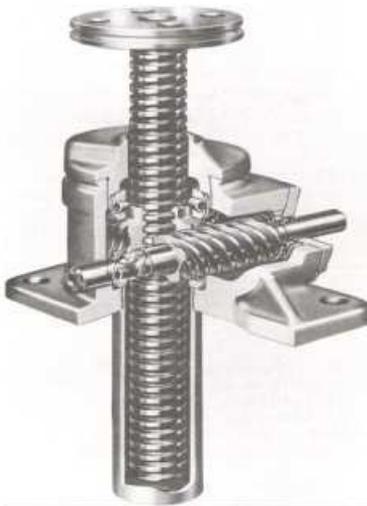
2.2.1 Definições de Fusos de Movimentação (*leadscrew, powerscrew*)



Torno Universal



Fonte: <http://www.mechatronics-mcc.com/>



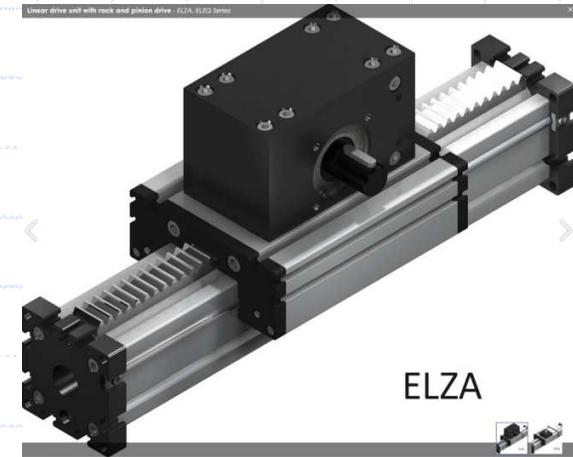
2.2.1 Definições de Fusos de Movimentação (*leadscrew, powerscrew*)



** Outros elementos conversores de movimento

Conversão de movimento rotativo/linear em máquinas:

- Pinhão/cremalheira
- Fusos planetários
- Fusos hidráulicos

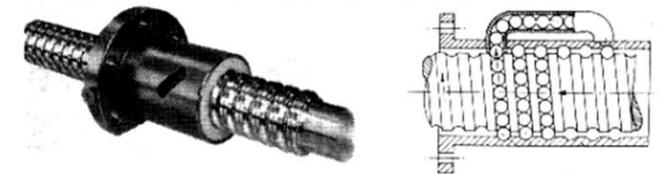


2.2.1 Definições de Fusos de movimentação (*Ballscrew*)

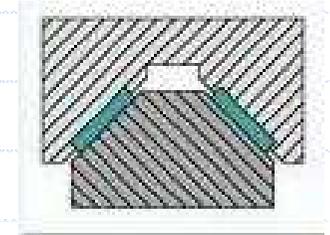


Ball screws are noted for efficiently moving high loads with outstanding accuracy. Here, they're used in solar arrays that track the sun.

<http://www.machinedesign.com/linear-motion/fundamentals-ball-screws>



A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares



A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

✓ Elementos mecânicos/estruturais que permitem:

- Deslizamento de um componente a outro em um padrão estabelecido e;
- Absorção dos carregamentos (impactos/vibrações*).

✓ Classificação das guias em relação à:

- Número de graus de liberdade
- Forma da seção transversal
- Formas de movimentação e restrições.

A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

➤ Graus de liberdade

Para um elemento móvel com deslocamento relativo linear sobre uma guia, na direção x pode-se ter até seis graus de liberdade:

- Rolamento (rotação em torno do eixo $-X$);
- Guinagem (rotação em torno do eixo $-Y$);
- Cambamento (rotação em torno do eixo $-Z$);
- Deslocamento na direção X ;
- Deslocamento na direção Y ;
- Deslocamento na direção Z .

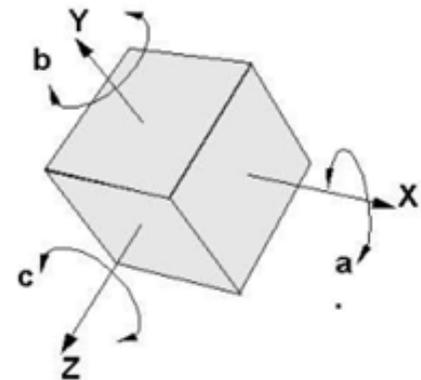


Figura B.2 – Referências para classificação dos Graus de Liberdade (ISO-230)

A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

➤ Forma da seção transversal

Guias Cilíndricas: forma mais simples de guias lineares (impressoras, máquinas-ferramenta).

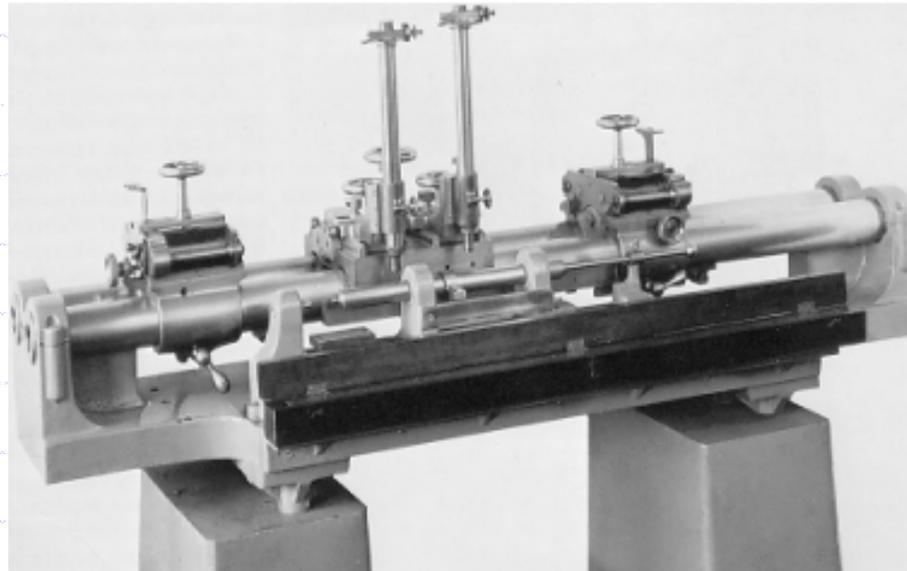
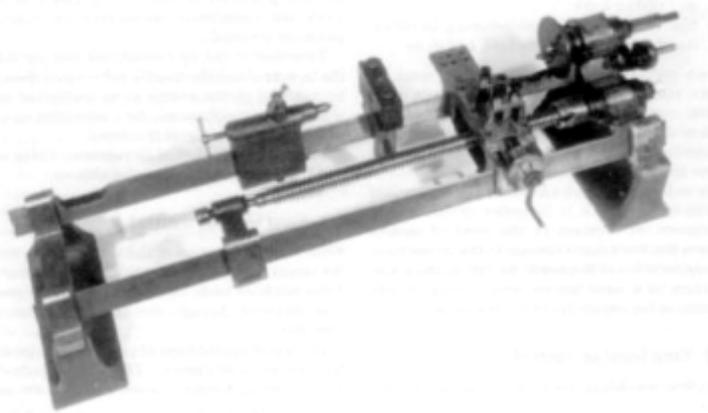


Figura A.1 – Comparador Rogers-Bond com guias cilíndricas século XIX (Moore, 1989 *apud* Stoeterau, 1999)

A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

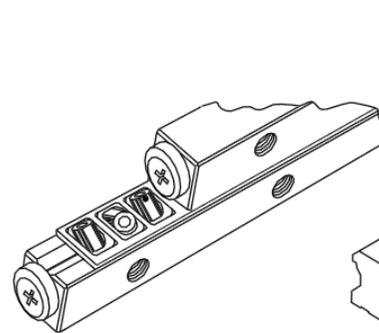
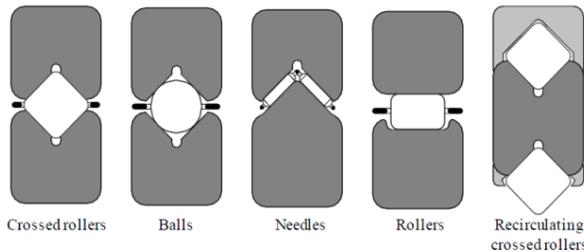
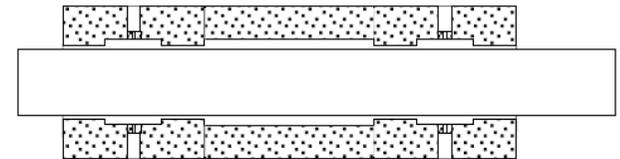
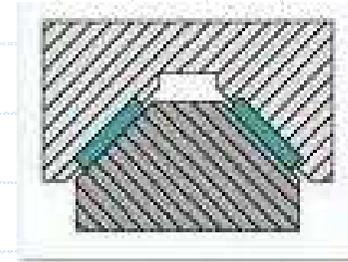
Guias lineares de seção transversal prismática ou angular são utilizadas amplamente em máquinas-ferramentas e variam de acordo com os fabricantes.



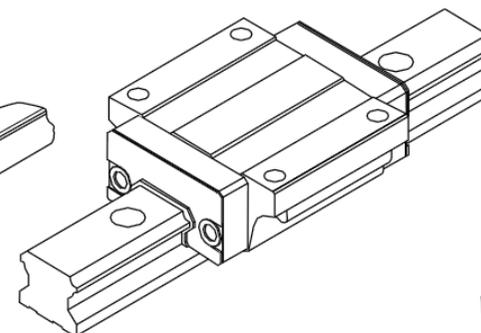
A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

➤ Princípios de movimentação

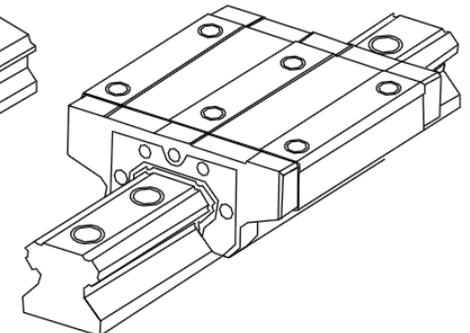
- Guias de deslizamento
- Guias de elementos rolantes
- Guias com lubrificação por filme de fluido
- Guias magnéticas
- Guias de elementos elásticos



Nonrecirculating roller bearing



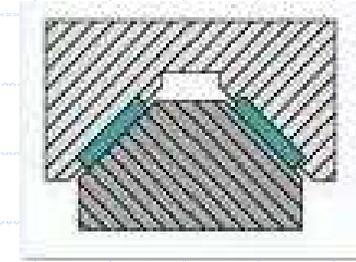
Recirculating ball bearing



Recirculating roller bearing

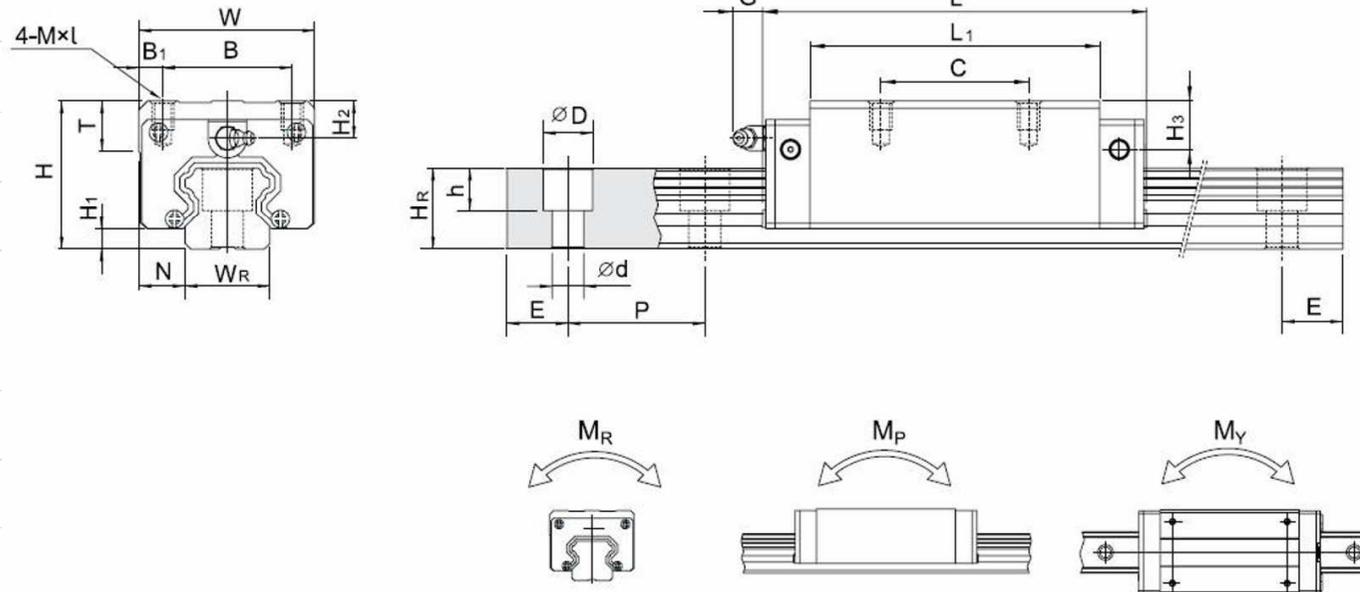
A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

- ✓ Solução mais antiga
- ✓ Construção mais simples e barata.
- ✓ Distribuição da carga sobre uma área relativamente grande (tensões de contato mais baixas)
- ✓ Elevada rigidez e amortecimento.
- ✓ Com coeficiente de atrito estático elevado (pares tribológicos, acabamento superficial e lubrificação).



A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

(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 ₀ (kN)	Static Rated Moment			Weight			
	H	H ₁	N	W	B	B ₁	C	L ₁	L	G	Mxl	T	H ₂	H ₃	W _R	H _R	D	h	d				P	E	M _R	M _P	M _Y	Block	Rail
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm				mm	mm	kN-m	kN-m	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

A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

Pares de materiais

- ✓ **Fofo sobre Fofo:** grande utilização devido à lubrificação inerente (grafite), boa usinabilidade e menor desgaste em condição operacional;
- ✓ **Fofo sobre aço:** propriedade de lubrificação inerente com material endurecido (maior resistência mecânica) e menor desgaste (elevada rigidez e capacidade de carga);
- ✓ **Latão sobre aço:** O latão também oferece boa lubrificação, quando em contato com o aço.
 - ✓ **Poroso e dúctil:** forma reservatório de lubrificação.
 - ✓ **Operação:** lubrificante é trazido para a superfície, reduzindo μ (sistema fechado em *loop*) que regular coeficiente de atrito e calor gerado.

A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

Pares de materiais

✓ 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 colada à superfície metálica (cuidados operacionais).

✓ Exemplo: Turcite® (Pressão máxima: 140 N/mm^2 ; velocidade máxima $2,5 \text{ m/s}$, Temperatura máxima: 280°C e Mínima: -200°C e coeficiente de atrito sem lubrificação: $0,02 - 0,2$)

A. Elementos acessórios: guias e mancais lineares

Pares de materiais

✓ Cerâmica sobre outros materiais: Elevada dureza, sem desgaste, sem geração de calor, vida útil elevada*.

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

B. Sistemas de movimentação: guias (mancais lineares)

✓ Parâmetros críticos de projeto e operação

- Limites de velocidade e aceleração
 - Faixa de deslocamento
 - Carregamentos
 - Acuracidade
 - Repetibilidade
 - Resolução
 - Pré-carga
 - Rigidez
 - Vibração e resistência ao choque
 - Capacidade de amortecimento
 - Atrito
 - Variação térmica
 - Vedações
 - Peso
 - Manutenção e Disponibilidade $D(t)$
 - Compatibilidade de material
 - Requisitos de montagem (DFA, DFR... DF'x)
 - Custo
- Fluido (diferentes viscosidades, lubrificação mista, contato (aceleração, pré-carga, atrito, rigidez, amortecimento))

B. Sistemas de movimentação: guias (mancais lineares)

✓ Pré-carga

- **Atrito:** efeitos *stick-slip*;
- **Desempenho térmico:** melhor do que guias de elementos rolantes, sendo função (lubrificação, escolha dos materiais e superfícies de acabamento e pressão de contato);
- **Requer sistema de lubrificação automático;**
- **Configurações:** lineares, trilhos “curvos”, espaçamentos (pequenos) – Verificar deflexões.

B. Sistemas de movimentação: guias (mancais lineares)

✓ Parâmetros críticos de projeto e operação

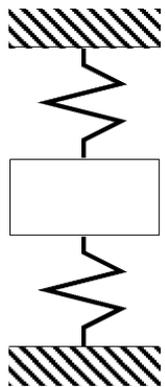
- **Vibração e resistência ao impacto:** elevada área de contato (guias hidrodinâmicas e hidrostáticas);
- **Capacidade de amortecimento:** Natureza viscoelástica de muito elementos de interface e extensa área de contato (melhorado com revestimentos e lubrificação, desde óleos menos viscosos até graxas)
 - Fornece amortecimento viscoso e “squeeze film”.

B. Sistemas de movimentação: guias (mancais lineares)

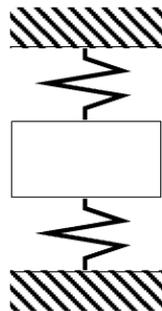
✓ Parâmetros críticos de projeto e operação

- Pré-carga: sapatas ao longo da guia (modular);
- Estimativa simplificada da Rigidez estática:

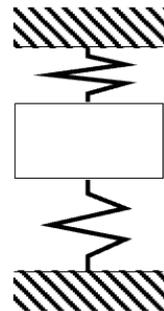
$$F_{\text{carregamento}} - (F_{\text{pré-carga}} + K_{\text{sapatasuperior}}\delta) + (F_{\text{pré-carga}} - K_{\text{sapatasinferior}}\delta) = 0 \quad (\text{A.1})$$



No preload



Preloaded



Preloaded with force applied

$$K_{\text{total}} = \frac{F_{\text{total}}}{\delta} \quad (\text{A.2})$$

$$K_{\text{total}} = K_{\text{sapatasuperior}} + K_{\text{sapatasinferior}} \quad (\text{A.3})$$

B. Sistemas de movimentação: guias (mancais lineares)

✓ Parâmetros críticos de projeto e operação

Guias de escorregamento necessitam de processo de fabricação mais refinado:

✓ Operações de rasqueteamento e posterior retificação.

Características gerais de guias de deslizamento:

- Alto custo
- Alta rigidez
- Alta capacidade de carga
- Elevado atrito
- Presença de *stick-slip*
- Baixas velocidades de avanço;
- Tendência a apresentar desgastes localizados
- Tendência a autotravamento.



C. Sistemas de movimentação: guias (mancais lineares)

✓ Algumas características de desempenho

- **Velocidades e limites de aceleração:** v_{\max} : 0,25 m/s e $a = 0,1g$.
Segurança para guias aerostáticas e hidrostáticas;
- **Aplicação de carga:** devido à área de contato (1MPa a 10 MPa);
- **Precisão:** após desgaste operacional (5 a 10 μm), com servo-controle;
- **Repetibilidade:** 0,1 a 10 μm (servo-controlado);
- **Resolução:** 2 a 10 μm ;

2.2.1 Definições de Fusos de Movimentação (*leadscrew, powerscrew*)

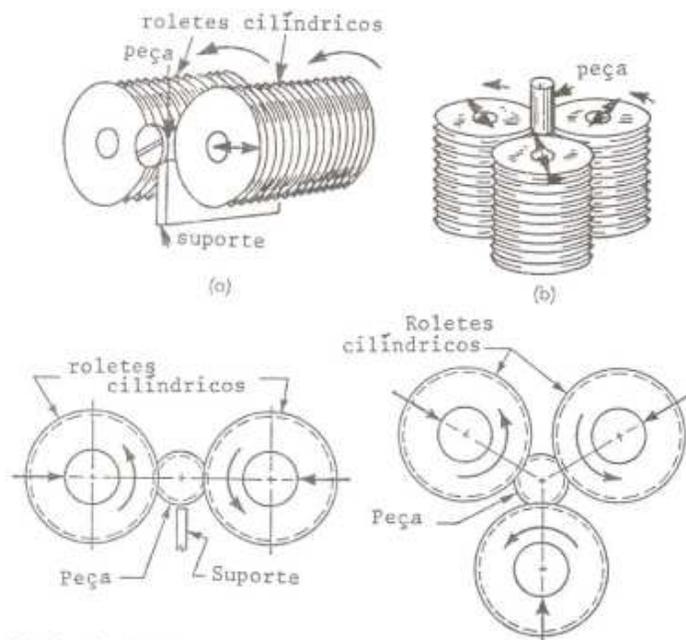
Os objetivos dos (fusos) parafusos de potência são:

- fornecer grande aproveitamento na operação de elevação de uma carga. Ex: macacos mecânicos.
- exercer forças de valor elevado. Ex: prensas e máquinas de ensaio de tração, compactadores de lixo residenciais;
- fornecer posicionamento axial preciso, para componente com movimento axial. Ex: micrômetros.

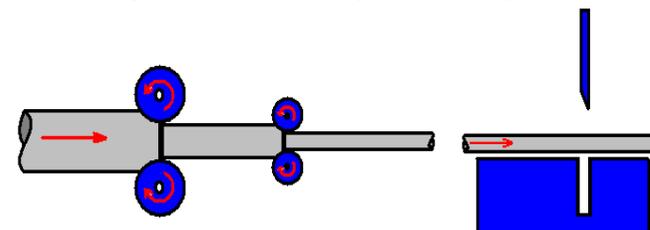
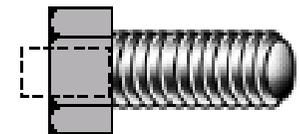
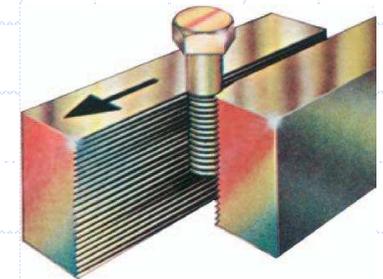
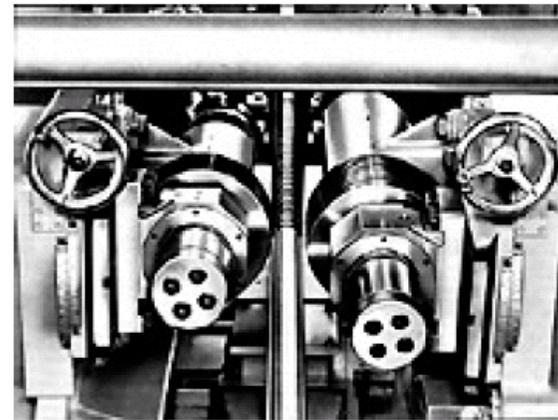
*** Fluidos de potência, fusos***

2.2.2 Processos de fabricação

- **Conformação plástica** (sem produção de cavaco): consiste em “prensar” ou “rolar” as roscas e recalcar as cabeças dos parafusos. Passagem de um “blank” entre matrizes endurecidas.



Fonte: Stemmer, C.E. **Ferramentas de Corte II**.
Editora UFSC, 2a. Edição. 1995.



2.2.2 Processos de fabricação

- **Usinagem** (com produção de cavaco): consiste em torneiar ou fresar as roscas, fresá-las com uma dentatriz de rotação elevada ou usiná-las com rebolos perfilados ou ferramentas de corte.

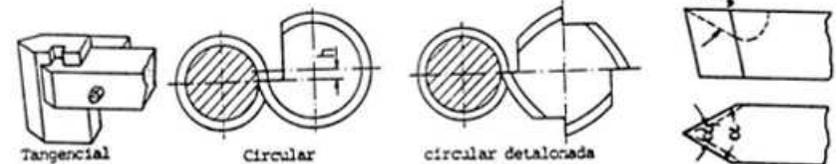
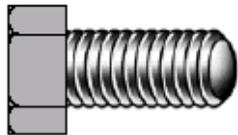
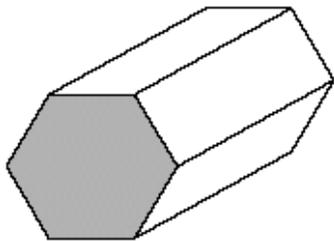


Fig.III.6 - Ferramentas de rosca de perfil constante.

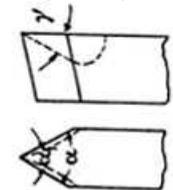


Fig.III.7 - Um ângulo diferente de 0° produz uma deformação do perfil da rosca.

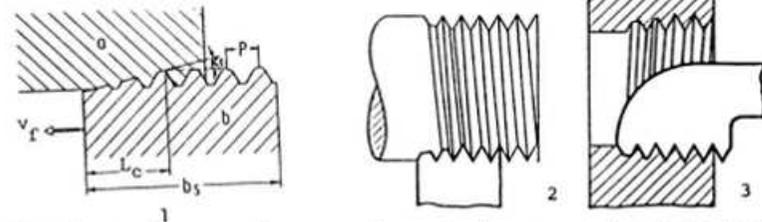


Fig.III.8 - Pentes de rosca: 1. a - peça; b - pente; L_c = comprimento do chanfro; P - passo da rosca; κ_r - ângulo do chanfro = ângulo de rendimento; 2. Pente de rosca externo; 3. Pente de rosca interno.

Diam. pequenos: tarrachas e machos;
Diam. maiores: torneamento.

Fonte: Stemmer, C.E. **Ferramentas de Corte II**. Editora UFSC, 2a. Edição. 1995.

2.2.3 Terminologia

- O elemento comum entre as uniões parafusadas é a sua rosca.
- A rosca é uma hélice desenvolvida sobre um cilindro, que promove o rosqueamento para avanço, dentro de um espaço de trabalho, quando rotacionada.
- Até a 2a. Guerra Mundial, não havia um padrão de roscas nos países industrializados:
 - **Série Unificada** (*Unified National Standard – UNS*) adotado pelos Estados Unidos, Reino Unido e Canadá;
 - **Série ISO** (*International Standard Organization*) adotado por grande parte dos países europeus, e no Brasil pela ABNT-NBR.

2.2.3 Terminologia

- Ambos os padrões adotam a mesma geometria de seção transversal, com exceção das unidades relacionadas às dimensões:

- ISO (Sistema Métrico);
- UNS (Sistema Unificado).

Quanto à forma tem-se:

- O passo da rosca (p) é a distância entre as formas adjacentes de rosca, medidas paralelamente ao eixo de rosca.
- O diâmetro externo ou nominal maior (d) é o maior diâmetro de uma rosca de parafuso;
- O diâmetro menor, núcleo ou raiz (d_r) é o menor diâmetro de uma rosca de parafuso.
- O diâmetro primitivo ou passo (d_m) é a diâmetro médio de uma rosca de parafuso.

2.2.3 Terminologia

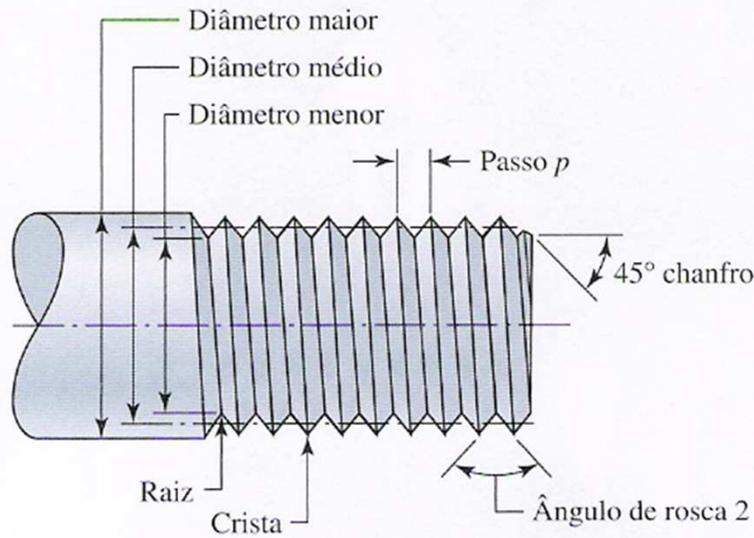
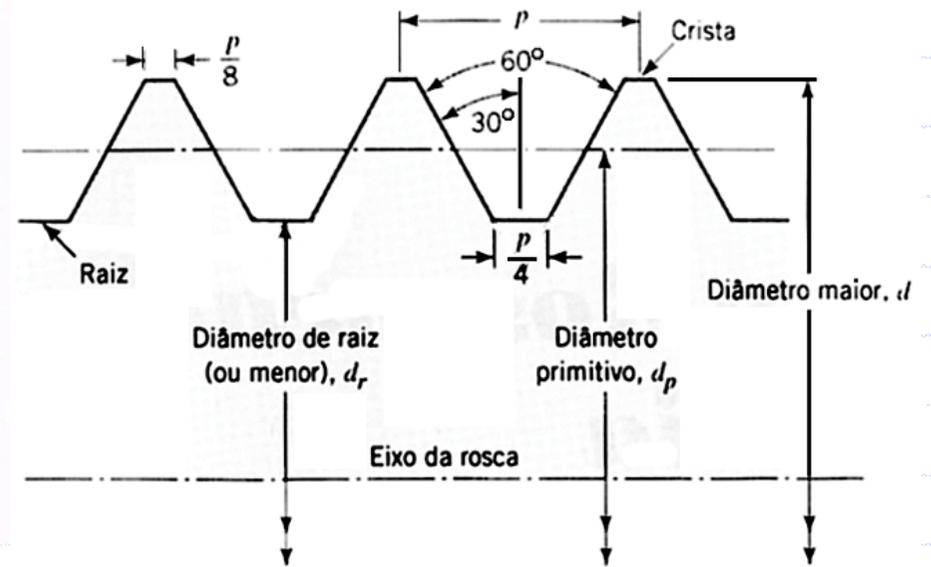
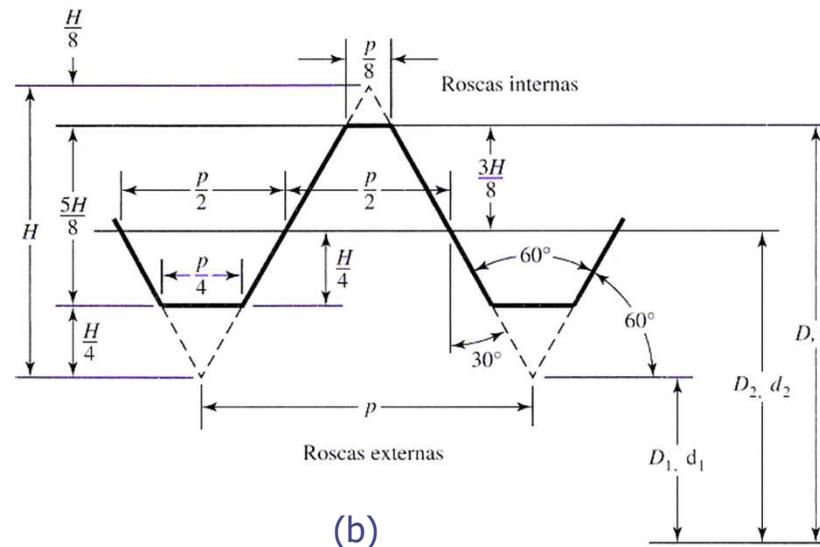


Figura 1- Terminologia de roscas de parafuso (Shigley, 2006)



(a)



(b)

Figura 2(a) e (b) – Perfil básico, para roscas Métricas e Unificadas.

2.2.3 Terminologia

O avanço l , é a distância axial que o parafuso percorre em uma volta.

Exemplo: Para uma única entrada de rosca, o avanço é igual ao passo ($l=n.p$ ou $l=p$).

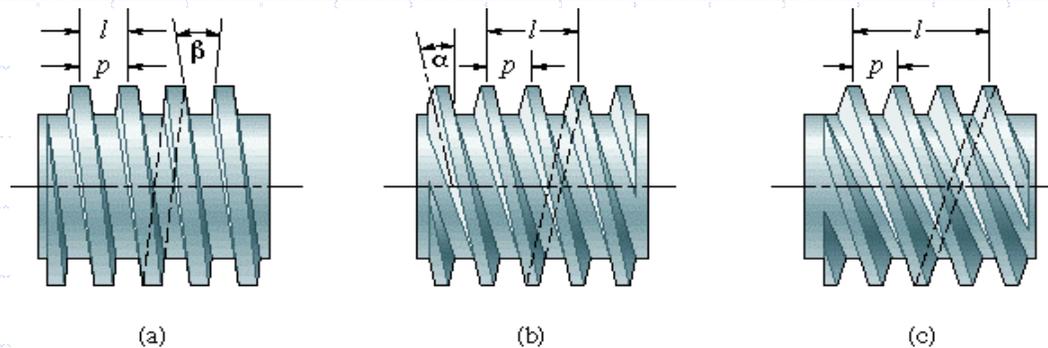


Figura 3- Diferentes entradas de rosca (Shigley, 2006).



- Ângulo de rosca triangular = 60° (parafusos rosqueados de fixação – sistema métrico).
- A crista e a raiz são definidas como planos, que reduzem a concentração de tensão.

2.2.4 Padronização

- Um rosca (parafuso) é especificada, pelo seu **diâmetro externo/nominal** e pelo **passo (p)**.

- As roscas unificadas são especificadas, através de seu diâmetro nominal, **número de roscas por polegada** e a série da rosca.

Exemplo: **5/8" – 18UNC – 2A (1A; 1B; 1C ou 2A; 2B; 3C) / LH***

- As roscas métricas são especificadas, através de seu diâmetro nominal e o passo em milímetros.

- Exemplo: **M12 x 1,75 / (Esq.)**

2.2.4 Padronização

As roscas podem apresentar três séries ou classes de passos, tanto na série ISO, quanto no sistema unificado:

- UNC: Passo grosso (utilizadas em repetições de montagem/desmontagens)
- UNF: Passo fino (fornecem maior resistência às vibrações. Aplicações na indústria automotiva e aeronáutica, maior diâmetro de raiz.)
- UNEF: passo extra-fino (utilizadas em componentes com paredes finas; roscas curtas e **porcas de retenção de mancais**).

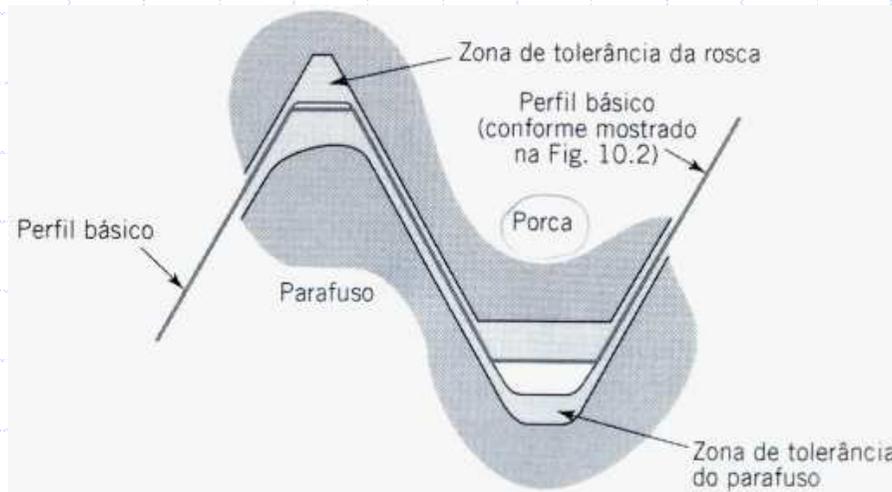


Figura 4- Regiões de tolerâncias, para diversas classes de roscas unificadas (Cada classe utiliza uma região das zonas mostradas) Juvinall & Marshek (2006).

2.2.4 Padronização

- A área sob tensão de tração (A_t) fornecida na Tabela 8-1 e 8-2 é baseada na média dos diâmetros de passo e de raiz, sendo essa área utilizada, para cálculo das tensões: se aproxima da menor área de fratura possível, devido à rosca helicoidal.

$$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_p + d_r}{2} \right)^2 \quad (a)$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A_t} \quad (b)$$

* Tabelas 8-1 e 8-2: Shigley – versão em PT (páginas 388 e 389).

Tabela A - Parafusos de Potência (Sistema Métrico)

Tabela 10.2 Dimensões Básicas das Roscas Métricas Padrão ISO de Parafusos

Diâmetro Nominal d (mm)	Roscas Grossas			Roscas Finas		
	Passo p (mm)	Diâmetro Menor, d_r (mm)	Área sob Tensão, A_t (mm ²)	Passo p (mm)	Diâmetro Menor, d_r (mm)	Área sob Tensão, A_t (mm ²)
3	0,5	2,39	5,03			
3,5	0,6	2,76	6,78			
4	0,7	3,14	8,78			
5	0,8	4,02	14,2			
6	1	4,77	20,1			
7	1	5,77	28,9			
8	1,25	6,47	36,6	1	6,77	39,2
10	1,5	8,16	58,0	1,25	8,47	61,2
12	1,75	9,85	84,3	1,25	10,5	92,1
14	2	11,6	115	1,5	12,2	125
16	2	13,6	157	1,5	14,2	167
18	2,5	14,9	192	1,5	16,2	216
20	2,5	16,9	245	1,5	18,2	272
22	2,5	18,9	303	1,5	20,2	333
24	3	20,3	353	2	21,6	384
27	3	23,3	459	2	24,6	496
30	3,5	25,7	561	2	27,6	621
33	3,5	28,7	694	2	30,6	761
36	4	31,1	817	3	32,3	865
39	4	34,1	976	3	35,3	1030

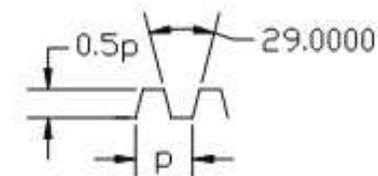
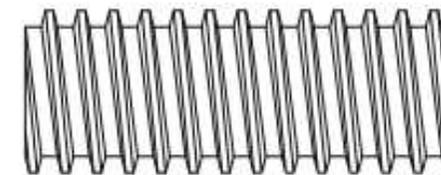
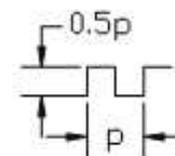
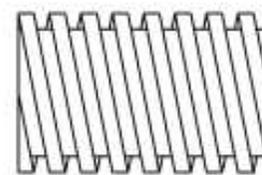
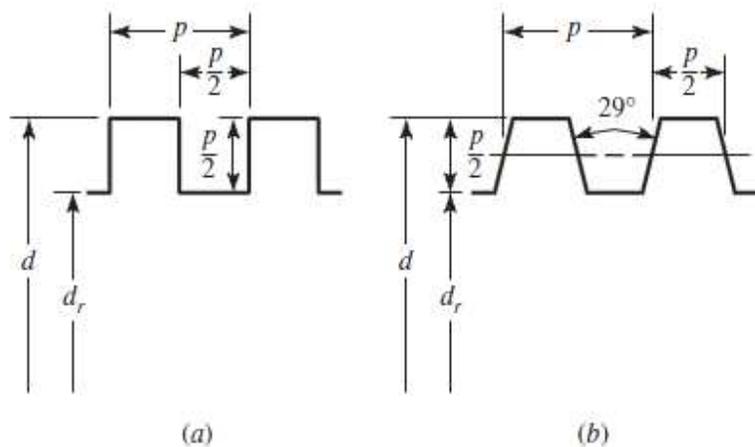
Tabela B - Parafusos de Potência (Sistema Unificado)

Tabela 10.3 Dimensões Padronizadas das Roscas de Parafusos de Potência

Diâmetro Maior d (in)	Roscas por Polegada		
	Acme e Acme Rebaixada ^a	Quadrada e Quadrada Modificada	Trapezoidal ^b
$\frac{1}{4}$	16	10	
$\frac{5}{16}$	14		
$\frac{3}{8}$	12		
$\frac{1}{2}$	10	8	
$\frac{7}{16}$	12		
$\frac{7}{8}$	10		
1	10	$6\frac{1}{2}$	16
$1\frac{1}{8}$	8	$5\frac{1}{2}$	16
$1\frac{1}{4}$	6	5	16
$1\frac{3}{8}$	6	$4\frac{1}{2}$	12
$1\frac{1}{2}$	5	4	12
$1\frac{3}{4}$	5		
$1\frac{7}{8}$	5	$3\frac{1}{2}$	10
2	4		10
$2\frac{1}{8}$	4	3	10
$2\frac{1}{4}$	4	$2\frac{1}{2}$	8
$2\frac{3}{8}$	4	$2\frac{1}{4}$	8
$2\frac{1}{2}$	3	$2\frac{1}{4}$	8
$2\frac{3}{4}$	3	2	8
3	3	2	6
$3\frac{1}{2}$	2	$1\frac{3}{4}$	6
4	2	$1\frac{5}{8}$	6
$4\frac{1}{2}$	2	$1\frac{1}{2}$	6
5	2		5

^aVeja os padrões ANSI B1.5-1977 para mais detalhes.

Tabela 8-3 (Passos comuns para roscas quadra e ACME-Parafusos de Potência) * Shigley - pág. 390



$d, \text{ in}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	2	$2\frac{1}{2}$	3
$p, \text{ in}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{14}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$

2.2.5 Modos de falhas

- Falha por escoamento;
- Falha por fadiga;
- Falhas superficiais;
- Desgaste por contato;
- Corrosão;
- Instabilidade elástica (*Buckling*).

Prevenção difícil: pontos/áreas indeterminados.

Mecanismos de falhas presentes em outros elementos de máquinas**:

2.2.5 Modos de falhas

✓ Materiais indicados para o par porca-parafuso:

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

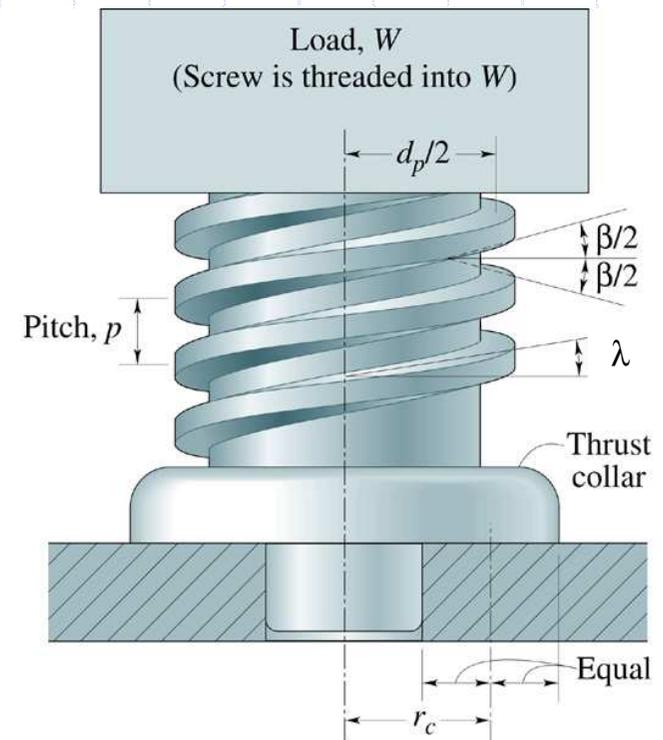
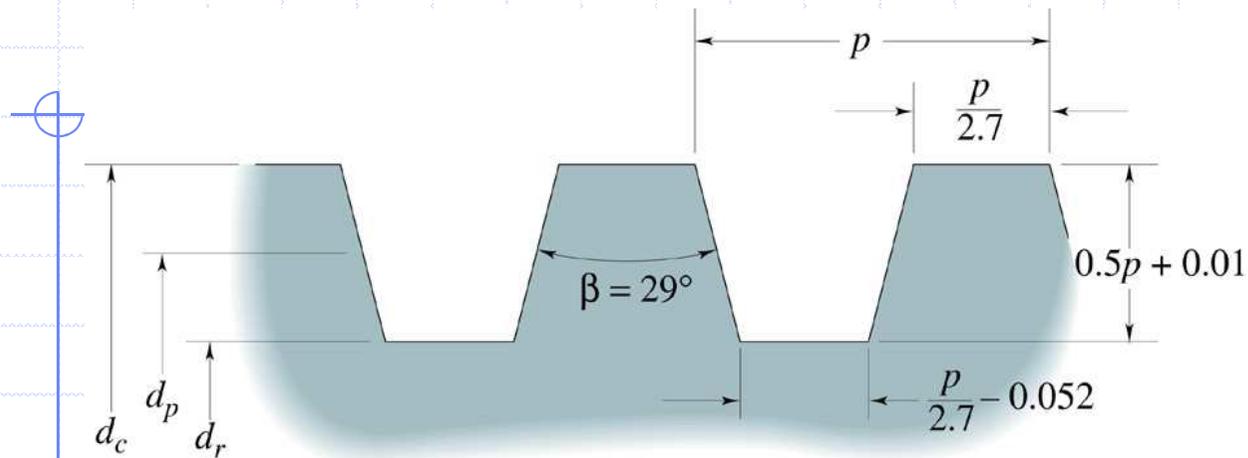


Parafusos: aço de baixo carbono cementado;

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

Fusos: tratamento superficial!!

2.2.6 a Perfil normalizado rosca ACME



2.2.6 Mecanismo de funcionamento

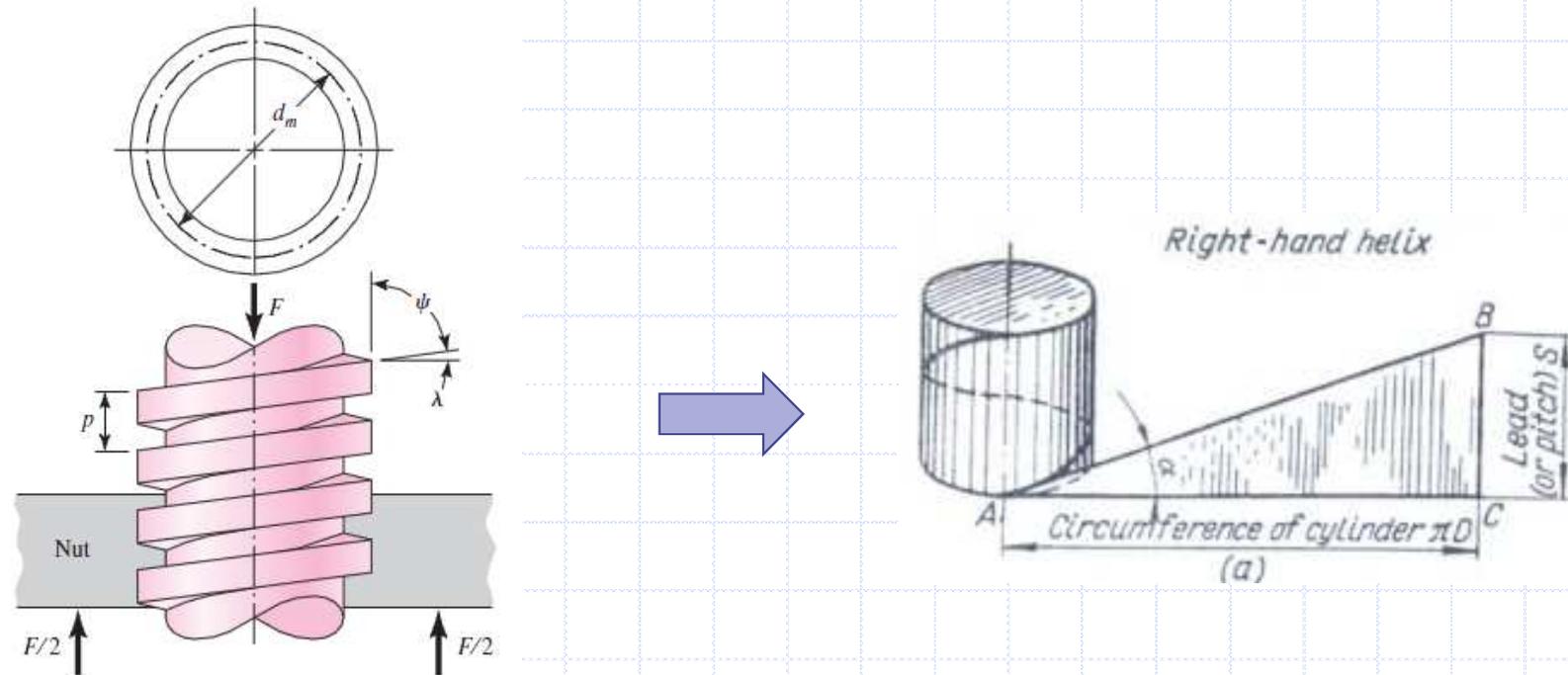
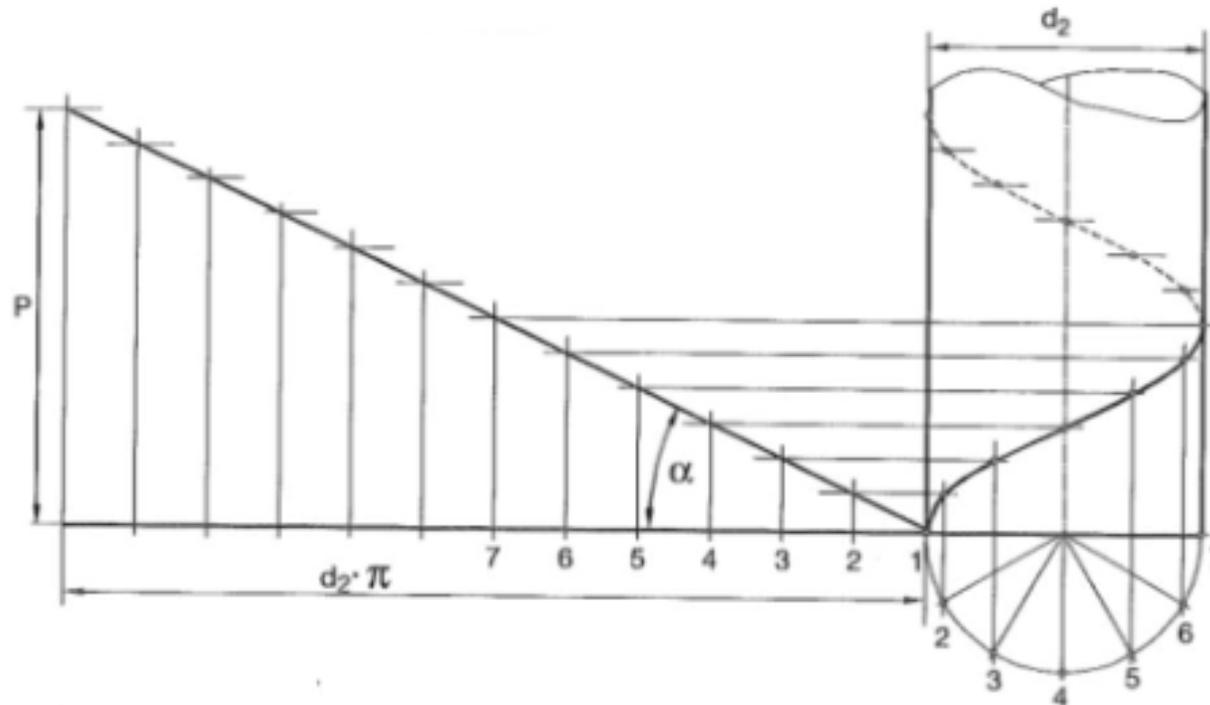


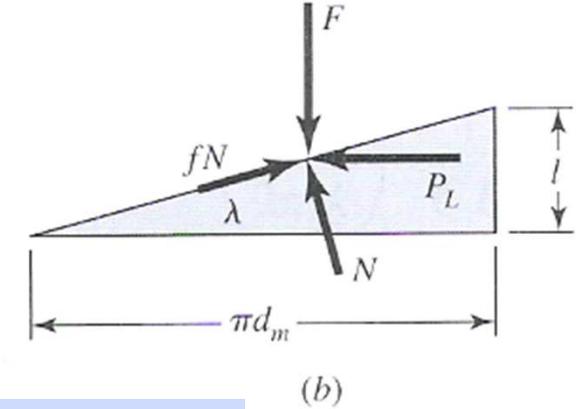
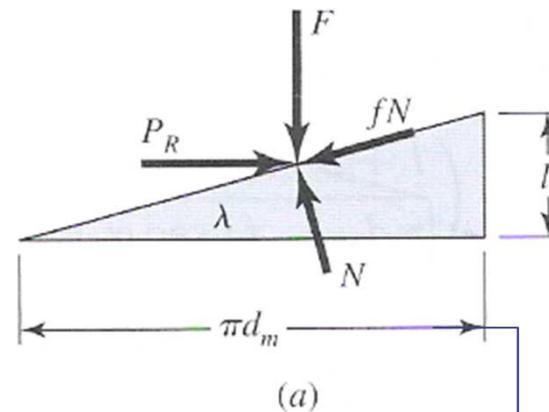
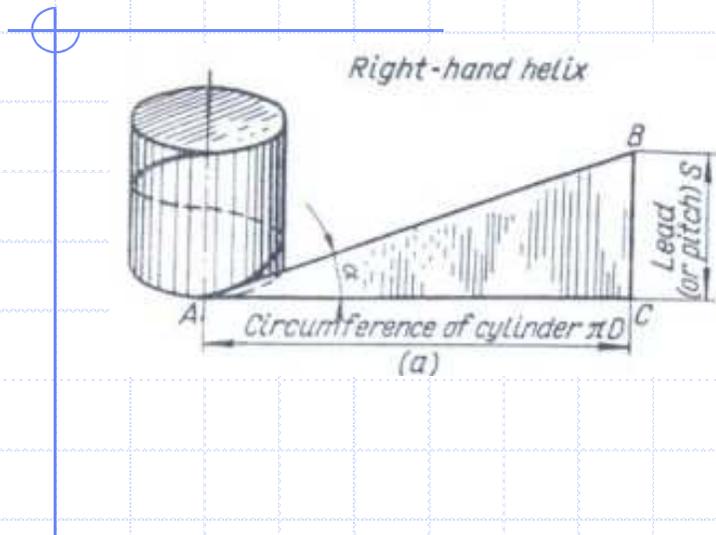
Figura 5 – Porção de um parafuso de potência (Shigley, 2004).

2.2.6 Mecanismo de funcionamento



Linha helicoidal direita e seu desenvolvimento com passo (h) e ângulo de inclinação (α)

2.2.7 Equações de equilíbrio



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

Equilíbrio de forças

$$\begin{aligned} \Sigma F_H &= P_R - N \sin \lambda - fN \cos \lambda = 0 \\ \Sigma F_V &= F + fN \sin \lambda - N \cos \lambda = 0 \end{aligned} \quad (1)$$



Elevando a carga

$$\begin{aligned} \Sigma F_H &= -P_L - N \sin \lambda + fN \cos \lambda = 0 \\ \Sigma F_V &= F - fN \sin \lambda - N \cos \lambda = 0 \end{aligned} \quad (2)$$



Baixando a carga

2.2.7 Equações de equilíbrio

$$\sum F_H = 0$$

$$P_R - N \operatorname{sen} \lambda - fN \cos \lambda = 0$$

$$P_R = N(\operatorname{sen} \lambda + f \cos \lambda) \quad (\text{a})$$

e

$$\sum F_v = 0$$

$$F + fN \operatorname{sen} \lambda - N \cos \lambda = 0$$

$$F = N(\cos \lambda - f \operatorname{sen} \lambda)$$

$$N = \frac{F}{(\cos \lambda - f \operatorname{sen} \lambda)} \quad (\text{b})$$

$$P_R = \left[\frac{F}{(\cos \lambda - f \operatorname{sen} \lambda)} \right] (\operatorname{sen} \lambda + f \cos \lambda) \quad (\text{c})$$

Rearranjando!

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

$$P_R = \frac{F \left[\left(\frac{l}{\pi d_m} \right) + f \right]}{1 - \left(f \frac{l}{\pi d_m} \right)}$$

Força necessária para
elevantar a carga (roscas
porca/parafuso)

2.2.7 Equações de equilíbrio

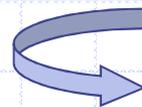
$$P_R = \frac{F[(l / \pi d_m) + f]}{1 - (fl / \pi d_m)} \quad (3)$$

$$P_L = \frac{F[f - (l / \pi d_m)]}{1 + (fl / \pi d_m)} \quad (4)$$

$$T_R = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + f\pi d_m}{\pi d_m - fl} \right) \quad (5)$$

$$T_L = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{f\pi d_m - l}{\pi d_m + fl} \right) \quad (6)$$

Atrito baixo ou/e elevado
avanço!



Condição de auto-travamento:
torque zero ou com valor
negativo.

2.2.8 Desempenho

A) Condição de autotravamento

$$f \geq \tan \lambda \quad (7)$$

B) Eficiência

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

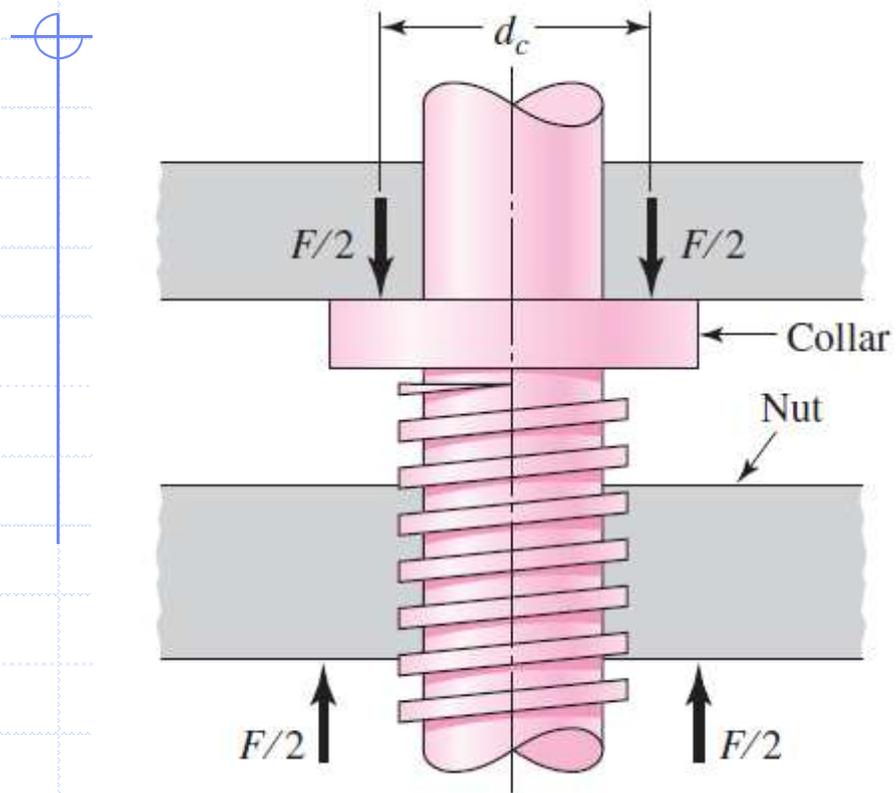
$$T_o = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + f\pi d_p}{\pi d_p - fl} \right) = \frac{Fl}{2\pi}$$



$$\varepsilon = \frac{T_o}{T_R} = \frac{Fl}{2\pi T_R} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{Fl}{2\pi T_r}$$

2.2.9 Adição do colar

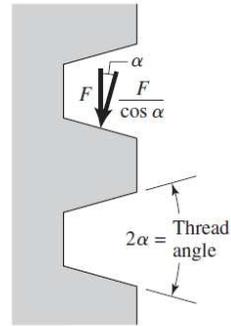


$$T_c = \frac{F f_c d_c}{2} \quad (9)$$

✓ Coeficiente de atrito
Estático e dinâmico!

Figura 9 – “Colar” –Mancal axial (*Thrust bearing*)
(Shigley, 2004).

2.2.10 Força e torque para roscas ACME



$$\sum F_H = 0$$

$$P_R - fN \cos \lambda - N \sin \lambda \cos \alpha = 0$$

$$P_R = N(f \cos \lambda + \sin \lambda \cos \alpha) \quad (a)$$

e

$$\sum F_v = 0$$

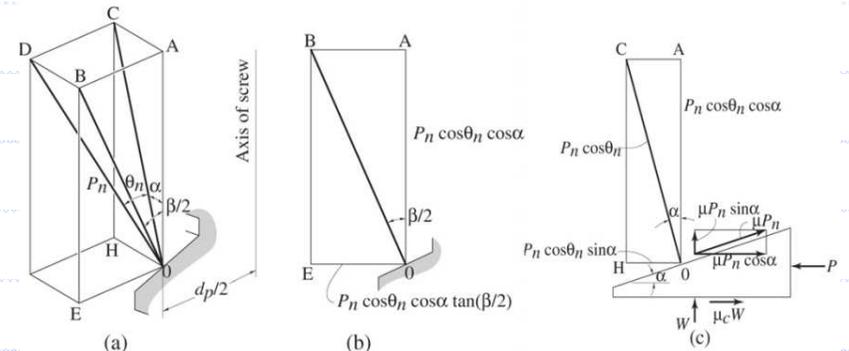
$$F + fN \sin \lambda - N \cos \lambda = 0$$

$$F = N(\cos \lambda + f \sin \lambda)$$

$$N = \frac{F}{(\cos \lambda \cos \alpha - f \sin \lambda)} \quad (b)$$



$$P_R = \frac{F(f \cos \lambda + \sin \lambda \cos \alpha)}{[(\cos \lambda \cos \alpha - f \sin \lambda)]} \quad (c')$$



$$\theta_n = \tan^{-1}(\cos \alpha \tan \beta/2)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{l}{\pi d_p}\right)$$

2.2.10 Força, torque autotravamento e eficiência para roscas ACME

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

(10) *Somar parcela do colar

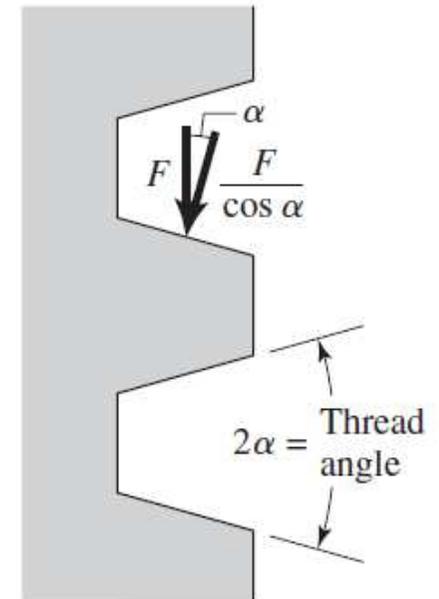
$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec \beta}{\pi d_m - f l \sec \beta} \right) + \frac{F f_c d_c}{2}$$

(11) – **Torque de abaixamento (T_L)

✓ **Condição de autotravamento do parafuso**

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

(12)



2.2.11. Tensões atuantes no parafuso

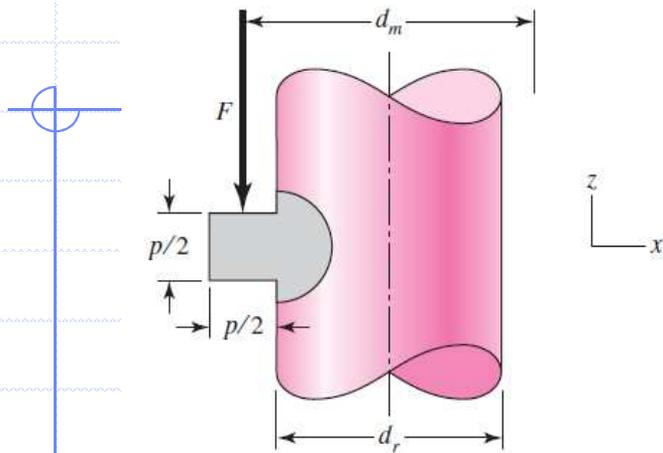


Figura 10 – Geometria da rosca quadrada útil, para identificação de tensões atuantes no corpo do parafuso e raiz de sua rosca (Shigley, 2004).

5.1 Tensão cisalhamento

$$\tau = \frac{16T}{\pi d_r^3}$$

5.2 Tensão axial: (sem ação da coluna*):

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi d_r^2}$$

- * Efeito de coluna:

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{crit} = S_y - \left(\frac{S_y}{2\pi} - \frac{l}{k}\right)^2 \frac{1}{CE}$$

Colunas curtas ou intermediárias
(Equação de Johnson)

- Em fusos de esferas recirculantes o valor da flambagem* é tabelado em função do comprimento do fuso.

2.2.11. Tensões atuantes na região dos filetes do parafuso

2.3 Tensão superficial na rosca:

$$\sigma_B = -\frac{F}{\pi d_m n_t p / 2} = -\frac{2F^{**}}{\pi d_m n_t^{**} p}$$

2.4 Tensão de flexão rosca:

$$\sigma_b = \frac{M}{I / C} = \frac{6F^*}{\pi d_r n_t p}$$

2.5 Tensão transversal de cisalhamento:

$$\tau = \frac{3V}{2A} = \frac{3F}{\pi d_r n_t p}$$

Sendo:

n_t = número de filetes acoplados;

d_r = Diâmetro de núcleo do parafuso.

** Shigley adota $n_t = 1$ filete e $F = 0,38(F)$

2.2.11 Tensões de Von Mises

$$\sigma_x = \frac{6F}{\pi d_r n_t p} \quad \tau_{xy} = 0$$

$$\sigma_y = 0 \quad \tau_{yz} = \frac{16T}{\pi d_r^3}$$

$$\sigma_z = -\frac{4F}{\pi d_r^2} \quad \tau_{zx} = 0$$

Tensões no "topo" do plano da raiz da rosca, através da identificação das tensões ortogonais normais e de cisalhamento, considerando o sistema de coordenadas na Figura 10.

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

2.2.12 Coeficientes de atrito para pares em parafusos de movimento

- Estudos indicam que o coeficiente de atrito (f), para parafusos de potência, com óleo lubrificante entre parafuso-porca, fornece um par tribológico de $0,15 \pm 0,05$.
- O atrito com um mancal de deslizamento (sem rolamento) é aproximadamente o mesmo obtido em roscas de porcas/parafusos: aço sobre bronze ou FOFO são combinações comuns entre mancal-pista.
- Se um mancal de elementos rolantes for utilizado, o coeficiente de atrito será de aproximadamente 1/10 do valor obtido em mancais de deslizamento (ou seja: de 0,01 a 0,02)----- **Uso de sistema de freios!**



Tabelas 8-4; 8-5 e 8-6 do Shigley: atritos com as porcas, em função da velocidade do sistema e par porca-parafuso.

* 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

Procedimento para pré-dimensionamento de parafusos de movimento

✓ Geometria X material x condições tribológicas

- ✓ Projeto com configuração que favoreça a condição de tração no fuso. * evitar flambagem (*buckling*) e verificar flecha máxima**
- ✓ Selecionar material e tratamento térmico (parafuso/fuso e porca)
- ✓ Compressão do Fuso ou CG deslocado (verificação de flambagem)
- ✓ Escolha da geometria inicial
- ✓ Estimativa do torque de elevação, condição de autotravamento e eficiência (iterativo)
- ✓ Identificação das seções críticas e verificação das tensões atuantes (tensões combinadas e teoria das falhas).

3. Fusos de esferas recirculantes

- Torque necessário para deslocamento de uma carga (W):

$$T_{total} = T_{atrito} + T_{aceleração}$$

$$T_{atrito} = \frac{F}{2\pi p e}$$

Sendo,

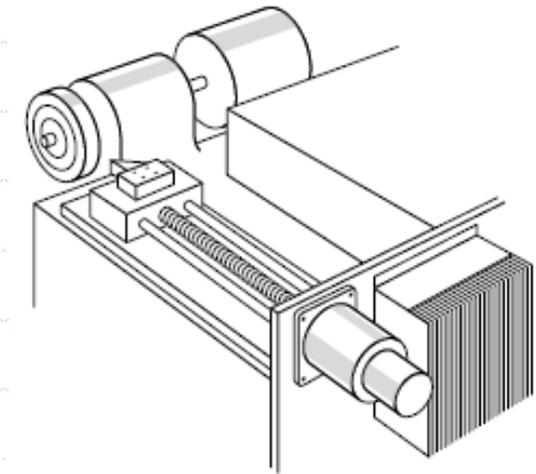
F = força de atrito (F = $f_{estático} \cdot W$);

p = passo (rev/s);

E = eficiência do fuso.

$$T_{acel.} = \frac{1}{g} (J_{carga} + J_{fuso} + J_{motor}) \frac{\omega}{t}$$

$$\omega = 2\pi p v \quad J_{carga} = \frac{W}{(2\pi p)^2} \quad J_{fuso} = \frac{\pi L \rho R^4}{2}$$



Sendo,

T = torque (N.m);

W = velocidade angular (rad/s);

t – tempo (s);

V = velocidade linear (m/s);

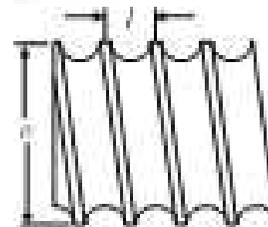
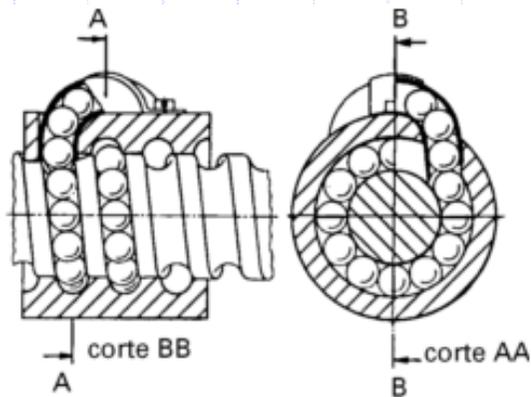
L = Comprimento (m);

R = Raio (m);

ρ = densidade (m/in³);

G = constante de gravidade.

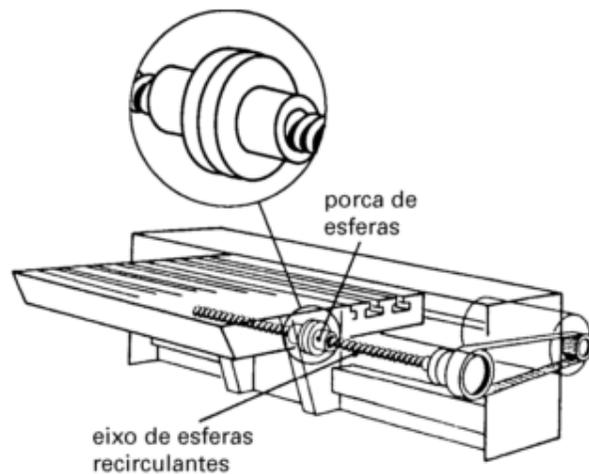
3. Fusos de esferas recirculantes



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

Acme Threads – ANSI B1.5, 1973

Buttress Threads – ANSI B1.9-1973



Coefficients of Static Friction Materials

(Dry Contact Unless Noted)

	μ_s
Steel on Steel	0.58
Steel on Steel (lubricated)	0.15
Aluminum on Steel	0.45
Copper on Steel	0.22
Brass on Steel	0.19
Teflon on Steel	0.04

Leadscrew Efficiencies

Type	Efficiency (%)		
	High	Median	Low
Ball-nut	95	90	85
Acme with metal nut*	55	40	35
Acme with plastic nut	85	65	50

* Since metallic nuts usually require a viscous lubricant, the coefficient of friction is both speed and temperature dependent.

3. Fusos de esferas recirculantes

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)

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

3. Fusos de esferas recirculantes

Principais cálculos e verificações:

- Torque durante a aceleração

$$T_2 = T_1 + J\omega$$

Sendo:

$$J = J_m + J_{G1} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \left[J_{G2} + J_s + \frac{W}{g} \left(\frac{l}{2\pi}\right)^3 \right]$$

3. Fusos de esferas recirculantes

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{Friction}} + T_{\text{Acceleration}}$$

$$T_{\text{Friction}} = \frac{F}{2\pi\rho e}$$

Where:

F = frictional force in ounces

ρ = pitch in revs/in

e = leadscrew efficiency

$$T_{\text{Accel}} = \frac{1}{g} (J_{\text{Load}} + J_{\text{Leadscrew}} + J_{\text{Motor}}) \frac{\omega}{t}$$

$$\omega = 2\pi\rho v$$

$$J_{\text{Load}} = \frac{W}{(2\pi\rho)^2}; J_{\text{Leadscrew}} = \frac{\pi L \rho R^4}{2}$$

3.1 Fusos de esferas recirculantes (Exemplo da dados obtidos com catalogos de fabricantes – skf, nsk, parker, ina)

Leadscrew Application Data

Inertia of Leadscrews per Inch

Diameter

In.	Steel	Brass	Alum.	
0.25	0.0017	0.0018	0.0006	oz-in ²
0.50	0.0275	0.0295	0.0094	oz-in ²
0.75	0.1392	0.1491	0.0478	oz-in ²
1.00	0.4398	0.4712	0.1512	oz-in ²
1.25	1.0738	1.1505	0.3691	oz-in ²
1.50	2.2266	2.3857	0.7654	oz-in ²
1.75	4.1251	4.4197	1.4180	oz-in ²
2.00	7.0372	7.5399	2.4190	oz-in ²
2.25	11.2723	12.0774	3.8748	oz-in ²
2.50	17.1807	18.4079	5.9059	oz-in ²

Diameter

In.	Steel	Brass	Alum.	
2.75	25.1543	26.9510	8.6468	oz-in ²
3.00	35.6259	38.1707	12.2464	oz-in ²
3.25	49.0699	52.5749	16.8678	oz-in ²
3.50	66.0015	70.7159	22.6880	oz-in ²
3.75	86.9774	93.1901	29.8985	oz-in ²
4.00	112.5956	120.6381	38.7047	oz-in ²
4.25	143.4951	153.7448	49.3264	oz-in ²
4.50	180.3564	193.2390	61.9975	oz-in ²
4.75	223.9009	239.8939	76.9659	oz-in ²
5.00	274.8916	294.5267	94.4940	oz-in ²

Coefficients of Static Friction Materials
(Dry Contact Unless Noted)

	μS
Steel on Steel	0.58
Steel on Steel (lubricated)	0.15
Aluminum on Steel	0.45
Copper on Steel	0.22
Brass on Steel	0.19
Teflon on Steel	0.04

Leadscrew Efficiencies

Type	Efficiency (%)		
	High	Median	Low
Ball-nut	95	90	85
Acme with metal nut*	55	40	35
Acme with plastic nut	85	65	50

* Since metallic nuts usually require a viscous lubricant, the coefficient of friction is both speed and temperature dependent.

A) Exemplo – Pré-dimensionamento e seleção de um PM

- Determine a potência necessária para acionar um parafuso de potência (*leadscrew*) 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:

a) Avanço :

$$l = np = 2(6) = 12\text{mm}$$

b) Diâmetro_{medio} :

$$d_m = 40 - 3 = 37\text{mm}$$

A) Exemplo – Pré-dimensionamento e seleção de um PM

Solução:

Da equação (5):

$$T_R = \frac{10(37)}{2} \left[\frac{12 + \pi(0,10)(37)}{\pi(37) - 0,10(12)} \right] + \frac{10(0,15)(60)}{2}$$

$$T_R = 83 N.m$$

Sendo:

$$n = \frac{V}{l} = \frac{48}{12} = 4 \text{ rev/s}$$

Onde:

$$\omega = 2\pi n$$

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

Assim, a potência necessária para acionar o parafusos será:

$$N = T\omega$$

$$N = 83(8\pi) = 2086 W$$

D) Exercício proposto

Um elevador de carga (Figura abaixo) utiliza um parafuso de potência com rosca quadrada de uma entrada, para elevar uma carga de 50 kN. O parafuso tem diâmetro maior de 36 mm e passo de 6 mm.

O raio médio do colar é de 40 mm. O coeficiente de atrito estático na rosca é estimado como 0,15 e no colar como 0,12. Calcule:

- A) Profundidade da rosca e diâmetros primitivo e de raiz e ângulo de avanço;
- B) Torque de partida e de operação, para elevar a carga.
- C) Condição de autotravamento
- D) Eficiência (proponha melhoria, com combinações de geometria e coeficiente de atrito)
- E) Estime as tensões de corpo do parafuso
- F) A partir desse pré-dimensionamento, indique um parafuso de movimento normalizado

