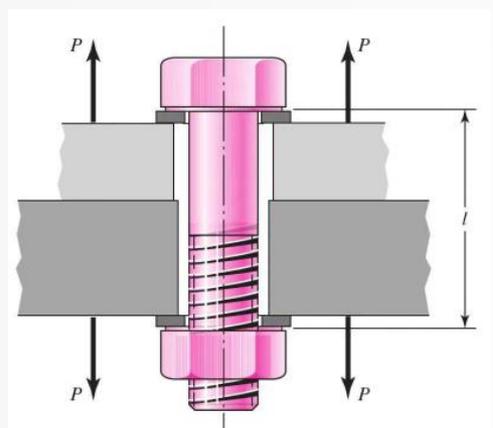
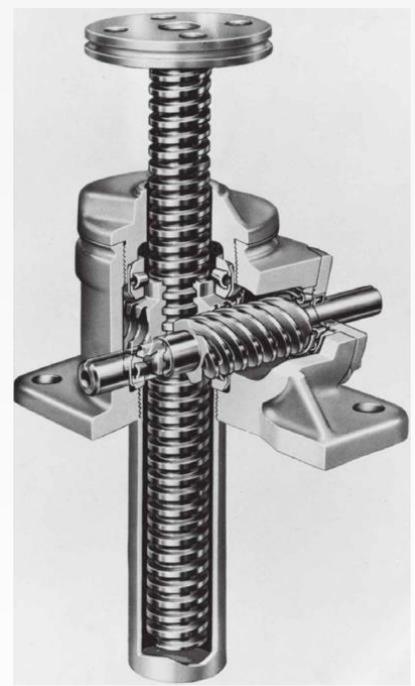
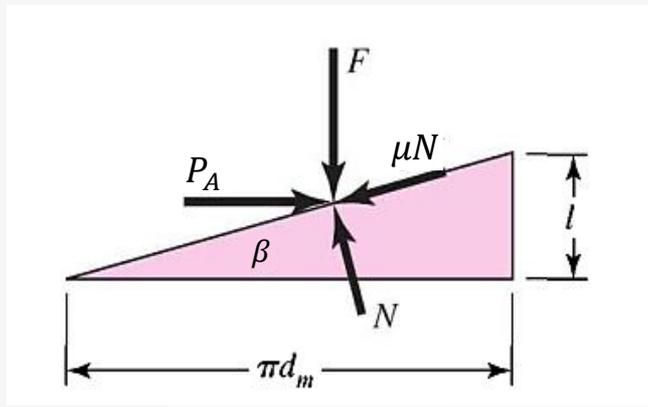
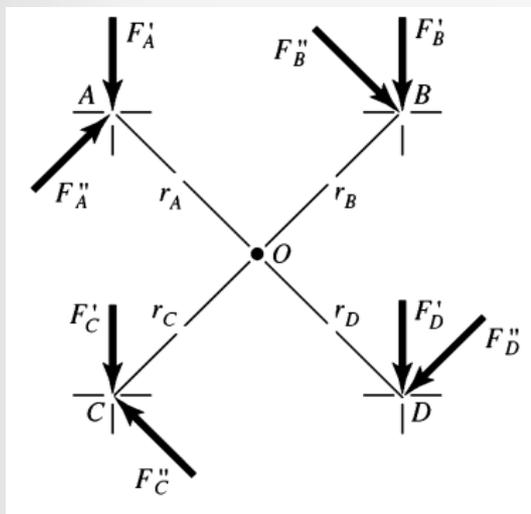


# Elementos de Máquinas

## Capítulo 5 Ligações Aparafusadas



Acetatos e imagens baseados em:  
 - Elementos de máquinas de Shigley, ed8  
 - Projeto de órgãos de máquinas, Moura Branco  
 - Apontamentos, Luís Coelho



## Objetivos:

- Identificar os tipos de tensões que ocorrem nos parafusos.
- Saber selecionar os diferentes tipos de parafusos.

## Índice

- Tipos de roscas;
- Parafusos de movimento;
- Solicitações e dimensionamento;
- Parafusos com pré-carga;
- Parafusos carregados excentricamente;
- Chavetas.



## Principais aplicações dos parafusos:

- Parafusos de fixação em uniões desmontáveis;
- Parafusos obturadores para tapar orifícios;
- Parafusos de transmissão de forças;
- Parafusos de movimento para transformar movimentos retilíneos em rotativos e vice versa.

## Principais vantagens dos parafusos:

- Baixo custo
- Facilidade de montagem e desmontagem

## Principais desvantagens:

- Possibilidade de ocorrer desaperto durante o funcionamento do equipamento (deve-se usar anilhas retentoras ou porcas com roscas especiais) [parafusos de fixação].
- Baixo rendimento de transmissão [parafusos de movimento].
- Elevado desgaste dos flancos das roscas [parafusos de movimento].



# Ligações Aparafusadas - exemplos

Capítulo 5

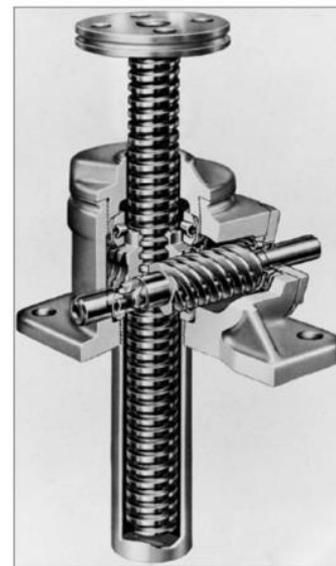
## Parafusos de fixação



## Materiais

- Aço carbono comum;
- Aço inoxidável;
- Alumínio;
- Latão;
- Bronze;
- Plásticos.

## Parafusos de movimento





# Tipos de roscas e definições

Capítulo 5

Rosca: hélice que faz com que o parafuso avance sobre o material ou porca quando rodado.

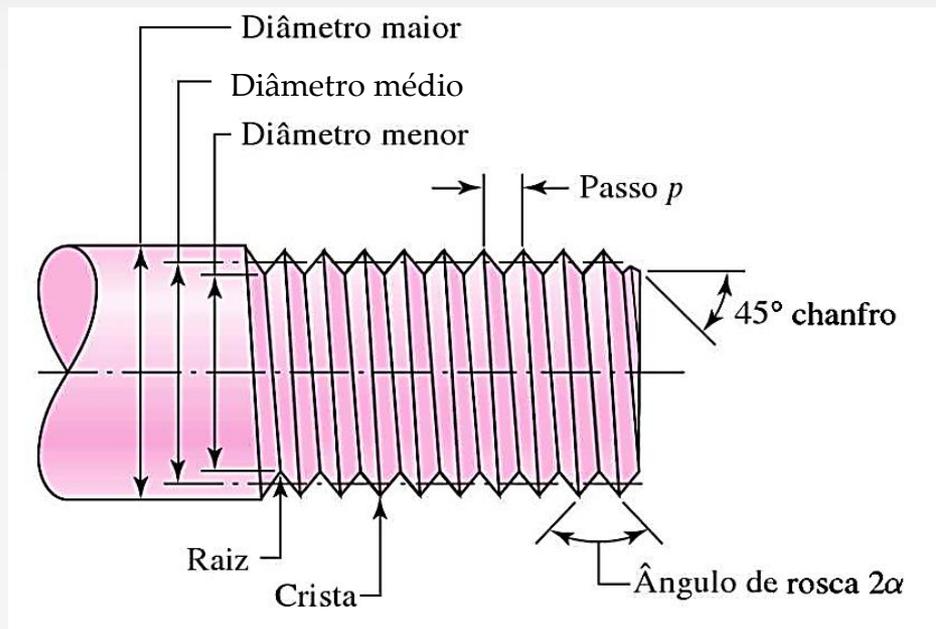
- **Interna:** porcas ou furos rosqueados;
- **Externa:** parafuso atarrachante;
- **Direita:** aperto no sentido horário;
- **Esquerda:** caso contrário;
- **Simple:** uma única entrada;
- **Múltiplas:** várias entradas;
- **Passo grosso** (mais comum);
- **Passo fino** (mais resistente).



# Tipos de roscas e definições

Capítulo 5

Elementos de Máquinas



- **Passo,  $p$ :** é a distância axial entre dois pontos correspondentes de filetes adjacentes;
- **Diâmetro nominal,  $d$ :** é o diâmetro exterior da parte rosçada;
- **Diâmetro médio,  $d_m$ :** é a média dos diâmetros exterior e de raiz;
- **Diâmetro da raiz,  $d_r$ :** é o diâmetro menor da rosca;
- **Ângulo de flanco,  $2\alpha$ :** é o ângulo formado pelos flancos da rosca;
- **Ângulo de hélice,  $\beta$ :** é o ângulo da reta planificada correspondente à hélice formada pelos pontos da rosca sobre um cilindro de diâmetro  $d_m$



# Tipos de roscas e definições

Capítulo 5

Norma de rosca American National (Unified): EUA e Reino Unido;

- Passo grosso, UNC: aplicações comuns;
- Passo fino, UNF: aplicações com vibrações (automóveis, aviões...);
- Passo extra fino, UNEF: aplicações com espessura de parede limitada

Rosca Unificada: “diâmetro nominal (polegada) x passo + UNF ou UNC”

Norma rosca Métrica, ISO 68, DIN 13-1;

Rosca Métrica: “símbolo M seguido do diâmetro nominal x passo” (ex: M8x1.5)

**Tipos de roscas de dimensões normalizadas com perfil:**

- Triangular (Whitworth, Sellers, e Métrico);
- ACME ( $2\alpha = 29$ ) ; trapezoidal ( $2\alpha = 30$ ); dente de serra; quadrada,...

Whitworth: 1840, Inglaterra, polegadas,  $2\alpha = 55^\circ$ ;

Sellers: 1864, EUA, polegadas,  $2\alpha = 60^\circ$ ;

Métrica: 1947, ISO, milímetros,  $2\alpha = 60^\circ$

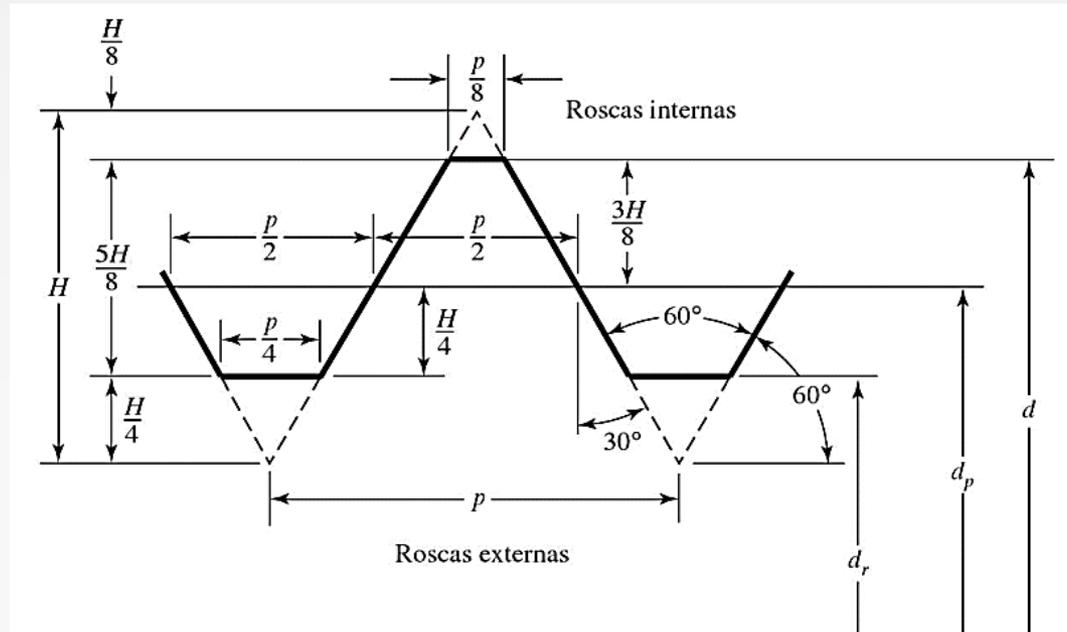


# Tipos de roscas e definições

Capítulo 5

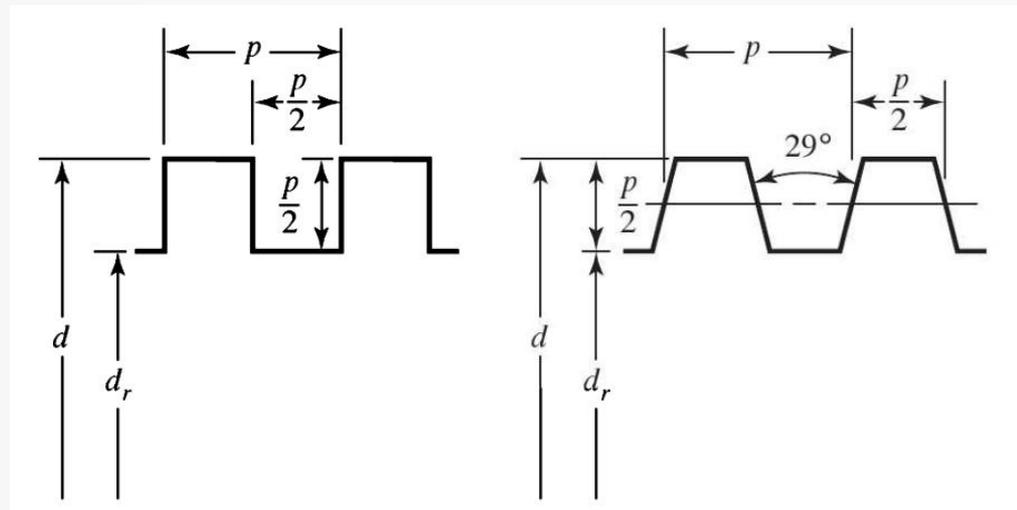
## Rosca Triangular

Rosca Métrica  
e  
Rosca Sellers



## Rosca quadrada e trapezoidal

Norma DIN 103

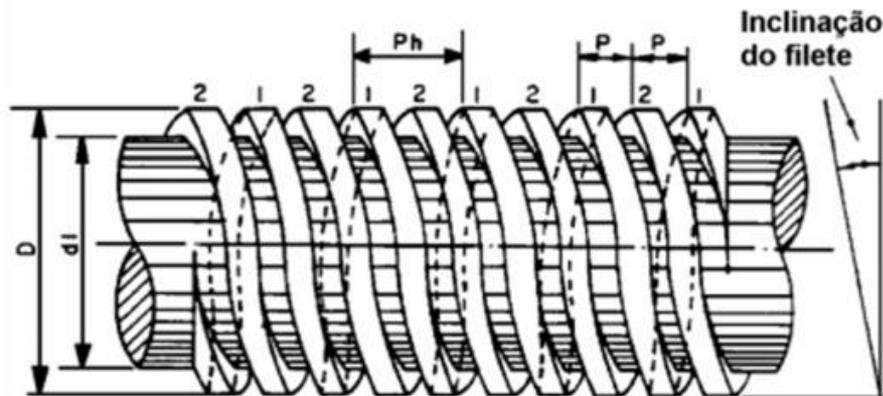




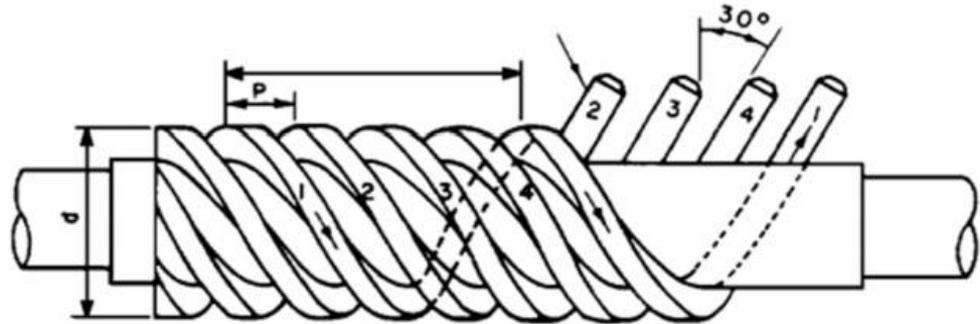
# Roscas com múltiplas entradas

- São roscas que possuem duas ou mais entradas a fim de realizar maior avanço axial em cada volta completa do parafuso.
- No caso de roscas com uma entrada, o avanço é igual ao passo, isto é, o deslocamento axial em uma volta é igual ao passo. Para roscas de duas, ou mais entradas, o avanço será o produto do passo pelo número de entradas. Por exemplo, uma rosca de 5 mm de passo com 4 entradas, o seu avanço será de  $5 \times 4 = 20$  mm

Duas entradas



Quatro entradas

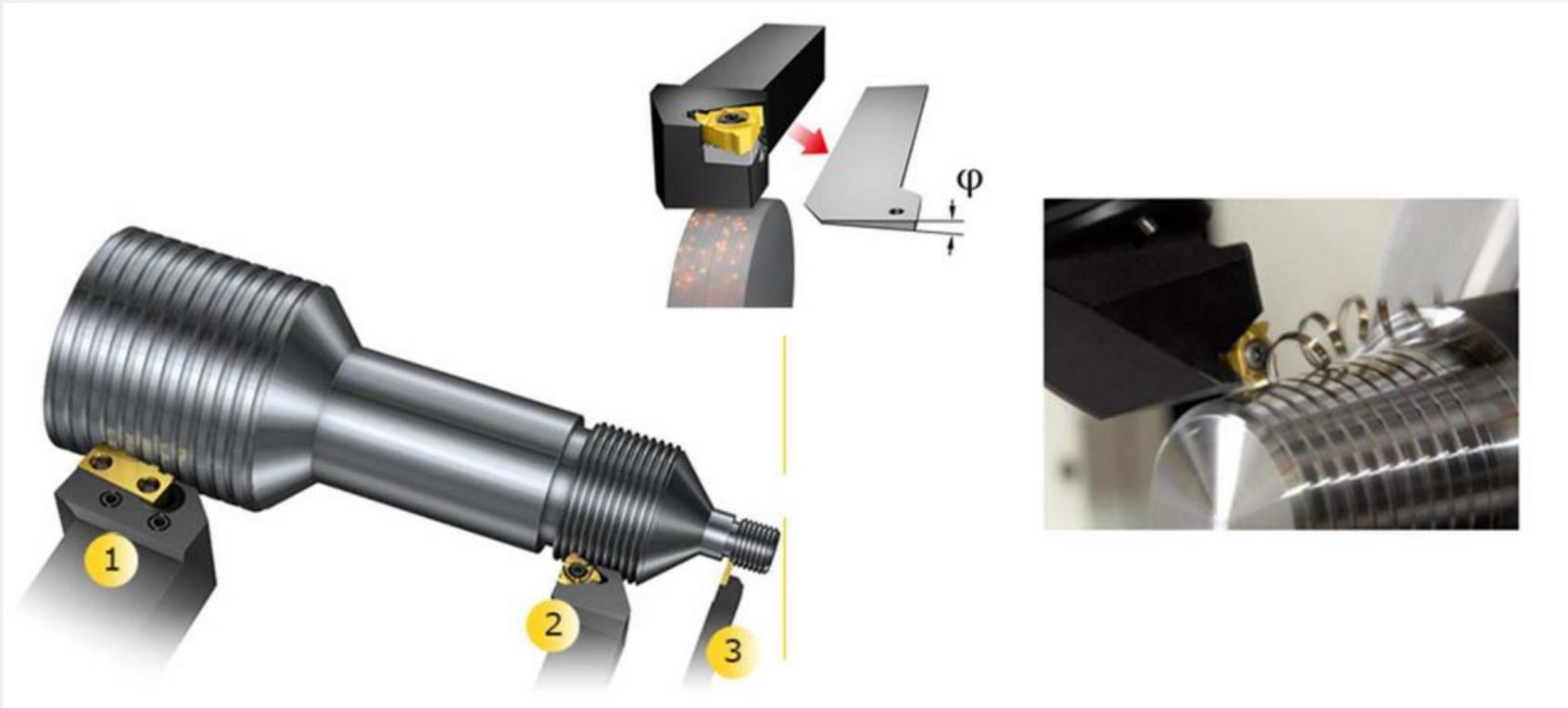




# Ferramentas para obtenção de roscas

Capítulo 5

Elementos de Máquinas



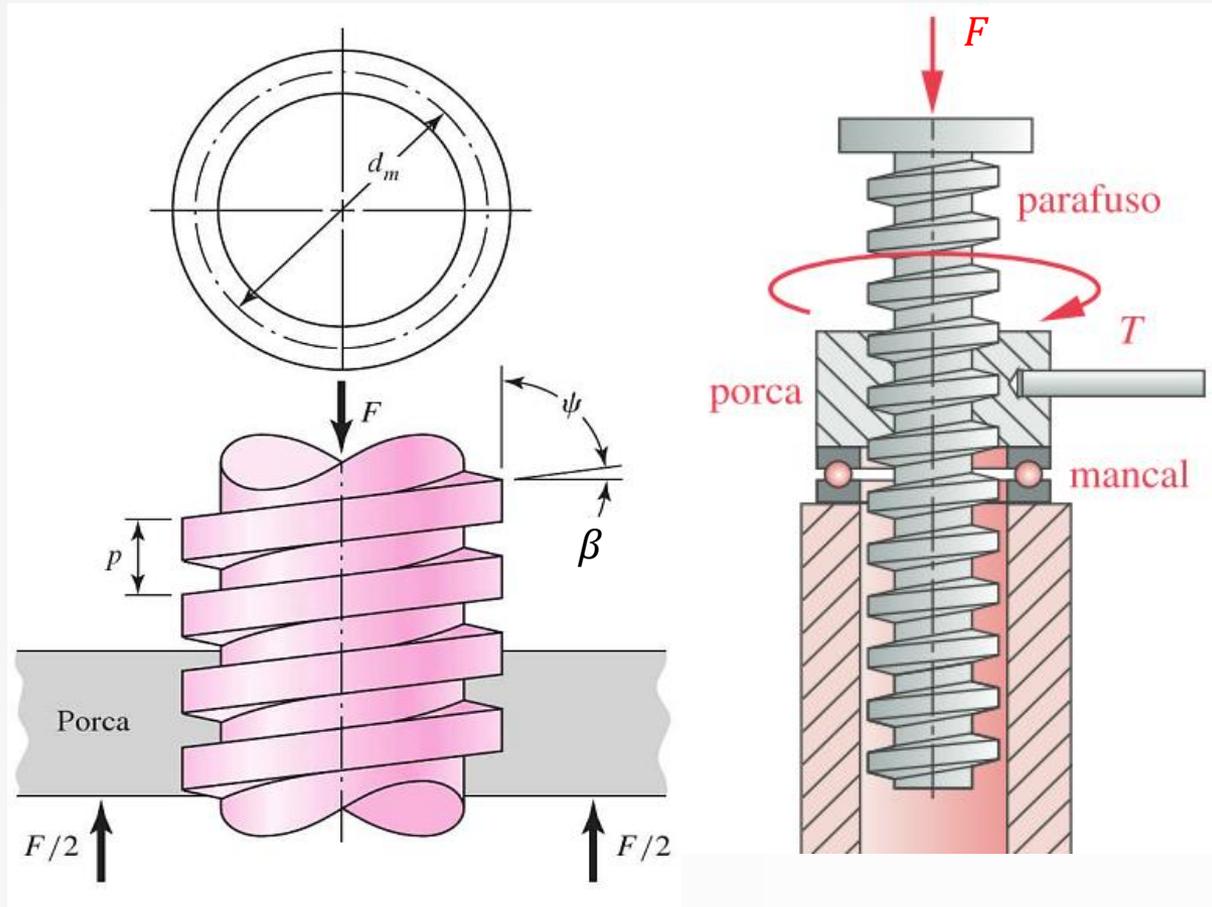


# Parafusos de movimento - rosca quadrada

Mecanismos que transformam movimento circular em movimento retilíneo.

São usados em:  
Fusos de tornos;  
Prensas;  
Macacos de elevação  
de cargas

Objetivo  
Determinar a  
força/momento  
necessária para subir  
ou  
descer a carga



Considere-se um parafuso de rosca quadrada, de uma entrada, com :  
 $d_m$  - diâmetro médio,  $p$  - passo e  $\beta$  - ângulo de hélice  
Carregado por uma força axial  $F$ .



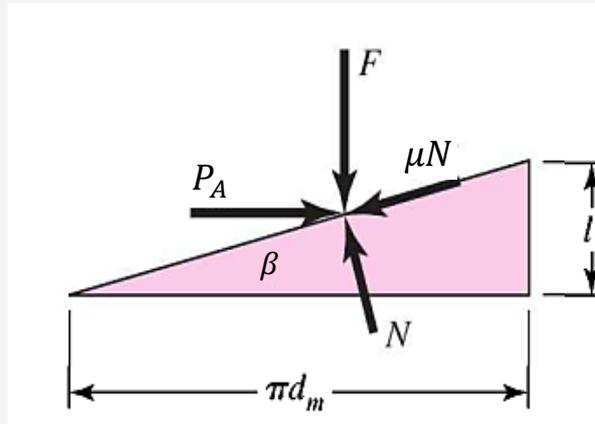
# Parafusos de movimento - rosca quadrada

$$tg(\beta) = \frac{l}{\pi d_m}$$

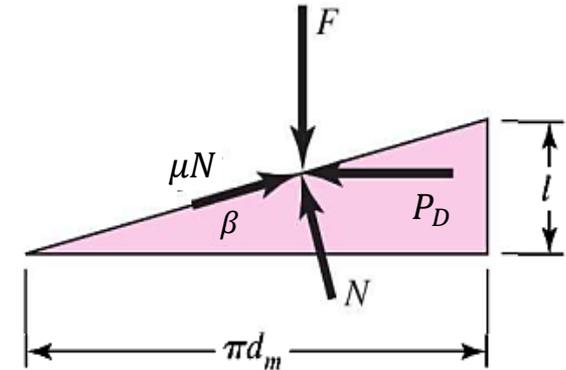
$$T_A = P_A \frac{d_m}{2}$$

$$T_D = P_D \frac{d_m}{2}$$

Levantamento da carga  
ou Aperto



Descida da carga  
ou Desaperto



Força tangencial

$$P_A = \frac{F(\sin(\beta) + \mu\cos(\beta))}{\cos(\beta) - \mu\sin(\beta)}$$

$$P_D = \frac{F(\mu\cos(\beta) - \sin(\beta))}{\cos(\beta) + \mu\sin(\beta)}$$

Momento torsor

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

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

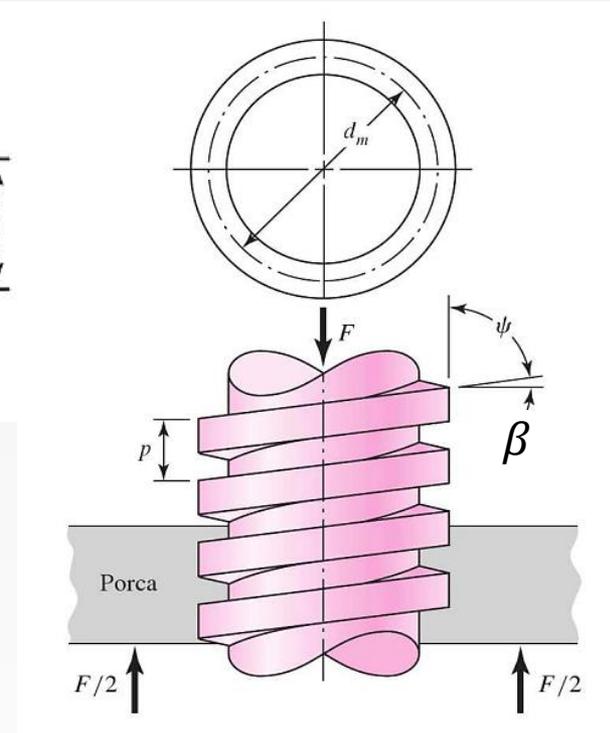
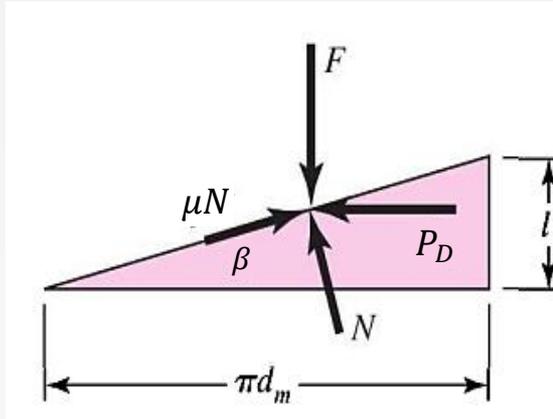


# Parafusos de movimento - rosca quadrada

## Auto retenção Não há Desaperto

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

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{l}{\pi d_m}$$



- Se  $T_D = 0$  ou  $T_D < 0$  o parafuso desaperta-se sozinho.

- Para que não haja desaperto,  $T_D > 0$  e designa-se que parafuso está em auto retenção, ou seja:

$$T_D > 0 \Rightarrow \mu \pi d_m - l > 0 \Rightarrow \mu > \frac{l}{\pi d_m} \Rightarrow$$

### Auto retenção

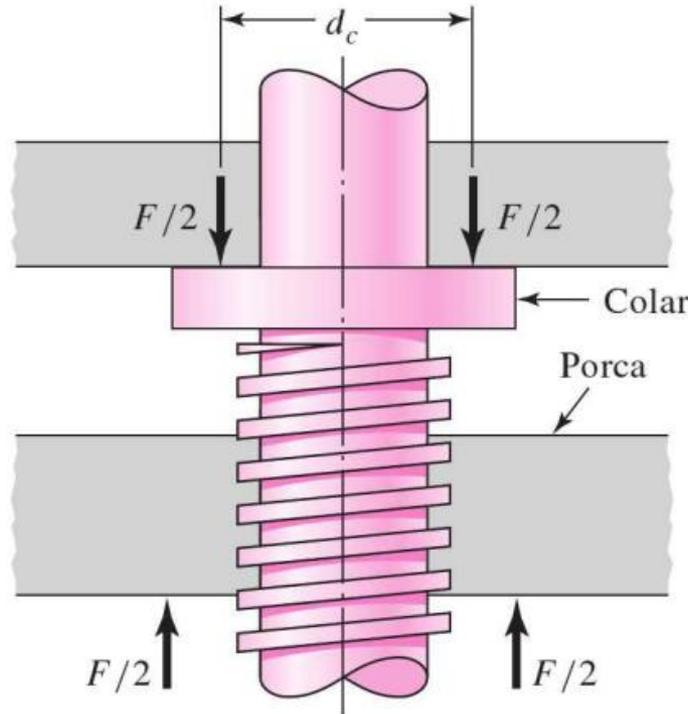
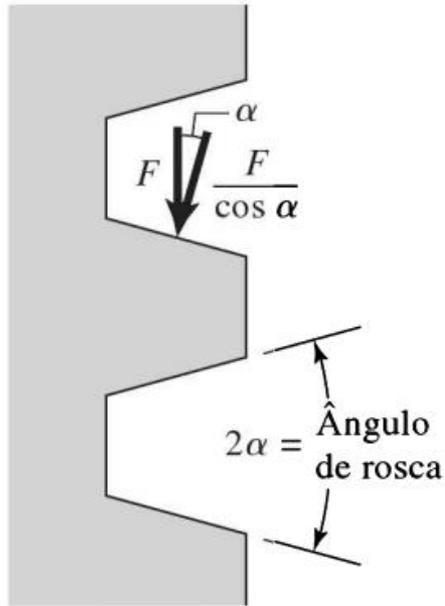
$$\mu > \operatorname{tg}(\beta)$$



# Parafusos de movimento - rosca trapezoidal

Capítulo 5

Elementos de Máquinas



Momento resistente do atrito do colar

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

Levantamento da carga ou Aperto.

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

Descida da carga ou Desaperto

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



# Dimensionamento de parafusos

## Carregamento axial de tração

A resistência de um parafuso a uma carga axial é equivalente à resistência de uma barra cilíndrica cuja secção transversal,  $A_t$ , corresponde a um diâmetro dado pela média do diâmetro médio e do diâmetro de raiz;

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

$A_t$  - área útil, à tração, de uma rosca (para igual resistência à de um varão não roscado).

Parafusos sujeitos a uma **força de tração axial**  
Tensão normal no parafuso

$$\sigma = \frac{F}{A_t}$$

## Carregamento axial de compressão

Dimensionamento à **instabilidade elástica** =>

Fórmula de Euler

ou

Fórmula de Johnson

## Parafusos de movimento

Para além da carga axial existe uma tensão de corte provocada pelo momento torsor . Logo temos um caso biaxial de tensão.

=> Tensão Equivalente



# Rosca métrica: diâmetros e áreas

$A_t$  - área útil, à tração, de uma rosca (para igual resistência à de um varão não roscado).

$A_r$  - é a área correspondente ao diâmetro da raiz.

Tabela 3.2 – Diâmetros e áreas dos parafusos do sistema ISO

Diâm. ext. $d_e$ (mm)	Série de passo grossa			Série de passo fina		
	Passo p (mm)	Área resist. $A_t$ (mm <sup>2</sup> )	Área do núcleo $A_r$ (mm <sup>2</sup> )	Passo p (mm)	Área resist. $A_t$ (mm <sup>2</sup> )	Área do núcleo $A_r$ (mm <sup>2</sup> )
1,6	0,35	1,27	1,07			
2	0,4	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
18	2,5	192	175	1,5	216	205
20	2,5	245	225	1,5	272	259

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



# Dimensionamento de parafusos

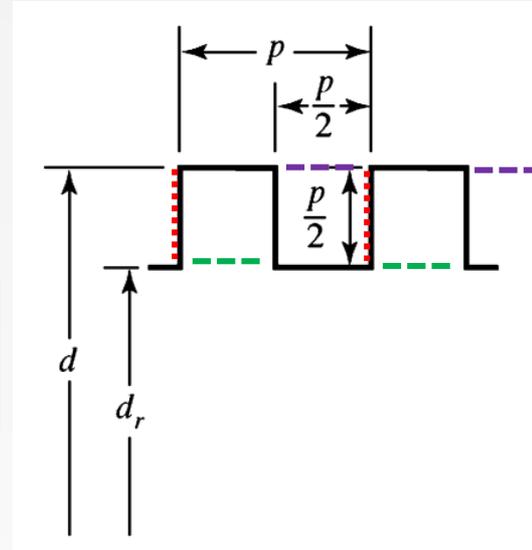
## Parafusos de roscas quadradas

As roscas vão ser sujeitas a uma pressão superficial na superfície de contacto parafuso-porca:

### Pressão superficial

$$\sigma = \frac{F}{\frac{h}{p} A_{croa}} = \frac{pF}{h \frac{\pi}{4} (d^2 - d_r^2)} \Rightarrow \sigma = \frac{4pF}{\pi h (d^2 - d_r^2)}$$

$h$  é a altura da rosca,  $p$  passo



### Tensão de corte na rosca no parafuso

$$\tau = \frac{F}{\pi d_r \frac{h}{2}} \Rightarrow \tau = \frac{2F}{\pi d_r h}$$

### Tensão de corte na rosca da porca

$$\tau = \frac{F}{\pi d \frac{h}{2}} \Rightarrow \tau = \frac{2F}{\pi d h}$$

Devem utilizar-se coeficientes de segurança elevados ( $n > 2$ ) pois os primeiros filetes são os mais solicitados.



# Classes de qualidade dos parafusos e das porcas

Tabela 3. 4 – Classificação de resistência para os parafusos de classe métrica

Classe métrica	Gama de dimensões	Tensão de prova [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Material	Designação no parafuso
4.6	M5-M36	225	400	240	Aço – Baixo teor de carbono	
4.8	M1,6-M16	310	420	340	Aço – Baixo teor de carbono	
5.8	M5-M24	380	520	420	Aço – Baixo teor de carbono	
8.8	M1,6-M36	600	830	660	Aço – Médio teor de carbono TT	
9.8	M1,6-M66	650	900	720	Aço – Médio teor de carbono TT	
10.9	M5-M36	830	1040	940	Aço – Liga de baixo teor de carbono TT	
12.9	M1,6-M36	970	1220	1100	Aço – Liga TT	

TT– Tratado termicamente.



# Rosca métrica: cargas máximas

Tabela 3.5 – Valores de carga e momento de aperto máximo

Diâmetro nominal	Passo	Classe 4.6		Classe 5.8		Classe 8.8	
		Carga máx. (N)	Momento de aperto máx. (N.mm)	Carga máx. (N)	Momento de aperto máx. (N.mm)	Carga máx. (N)	Momento de aperto máx. (N.mm)
d (mm)	p (mm)						
M 5	0,8	2 396	2 396	4 047	4 047	6 390	6 390
M 6	1,0	3 392	4 020	5 728	6 874	9 045	10 854
M 8	1,25	6 176	9 882	10 431	16 690	16 470	26 352
M 10	1,5	9 787	19 575	16 530	33 060	26 100	52 200
M 12	1,75	14 226	34 141	24 025	57 661	37 935	91 044
M 14	2,0	19 406	54 337	32 775	91 770	51 750	144 900
M 16	2,0	26 494	84 780	44 745	143 184	70 650	226 080
M 18	2,5	32 400	116 640	54 720	196 992	86 400	311 040
M 20	2,5	41 343	165 375	69 825	279 300	110 250	441 000
M 22	2,5	51 131	224 977	86 355	379 962	136 350	599 940
M 24	3,0	59 569	285 930	100 605	482 904	158 850	762 480
M 27	3,0	77 456	418 264	130 815	706 401	206 550	1 115 370
M 30	3,0	94 669	568 014	159 885	959 310	252 450	1 514 700

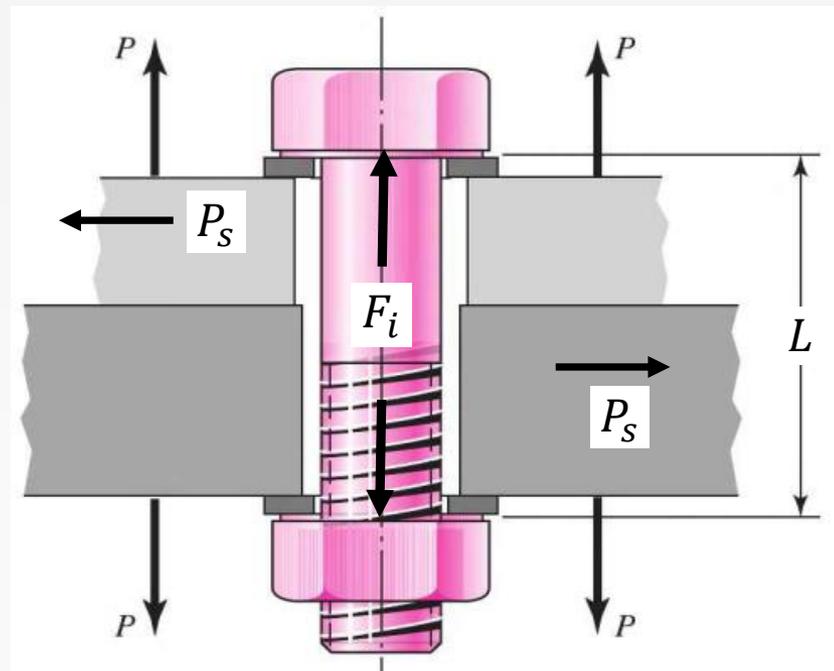


# Parafusos com pré-tensão

São utilizados em uniões desmontáveis que necessitem de ser suficientemente resistentes para suportar cargas exteriores de tração e corte.

## Objetivos da pré-tensão ( $F_i$ ):

- Evitar que a união se separe por aplicação de uma força normal exterior,  $P$ .
- Evitar deslocamento relativo das peças ligadas, através da criação duma força de atrito (entre as peças) suficiente para se o pôr a uma força transversal,  $P_s$



A **Constante de Rigidez** de uma peça elástica (ou no caso um parafuso) é a relação entre a carga aplicada,  $P$ , e a deformação produzida por essa carga.

$$K = \frac{P}{\delta}$$



# Parafusos com pré-tensão - Cálculo da rigidez

Capítulo 5

Elementos de Máquinas

## Cálculo da rigidez do parafuso

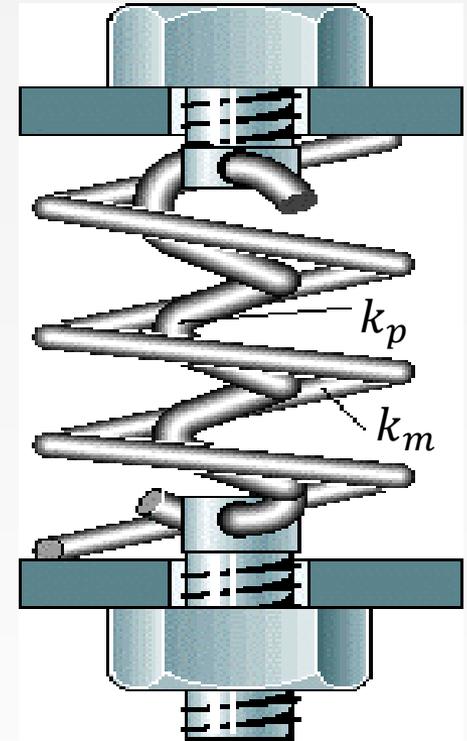
O parafuso é uma barra cilíndrica sujeita à tração e pela lei de Hooke:

$$\delta = \frac{PL}{AE} \Rightarrow P = \frac{AE}{L} \delta \Rightarrow k = \frac{AE}{L}$$

No caso dos parafusos,  $L$ , é a espessura total das peças a unir e, tendo em conta que a secção transversal é circular, temos

Constante de rigidez do parafuso

$$k_p = \frac{A_t E}{L}$$



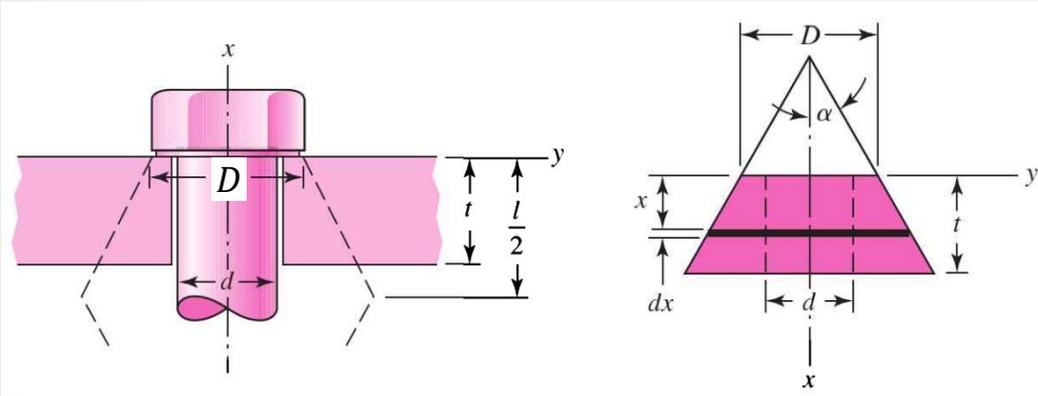
A flange pode ser constituída por mais de uma peça a unir, o que constitui uma associação de molas em série.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{m1}} + \frac{1}{k_{m2}} + \dots + \frac{1}{k_{mn}}$$



# Parafusos com pré-tensão - Cálculo da rigidez

## Cálculo da rigidez das peças a unir



Zona comprimida das duas peças ligadas considerada como um cone oco com ângulo  $\alpha$

$$d\delta = \frac{P}{EA} dx$$

$$\Rightarrow \dots \Rightarrow k_i = \frac{\pi E d \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\ln \left( \frac{(2t \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + D - d)(D + d)}{(2t \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + D + d)(D - d)} \right)}$$

Constante de rigidez de cada flange

- O ângulo  $\alpha$  mais comum é  $30^\circ$
- Para ligações de **duas peças com a mesma espessura, sem anilhas**, com o **mesmo material** e com  $D = 2d$  temos:

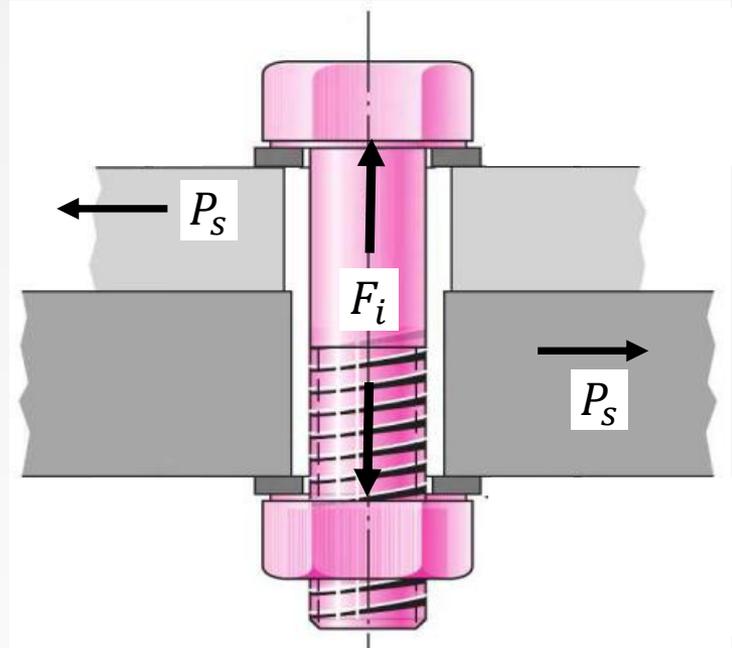
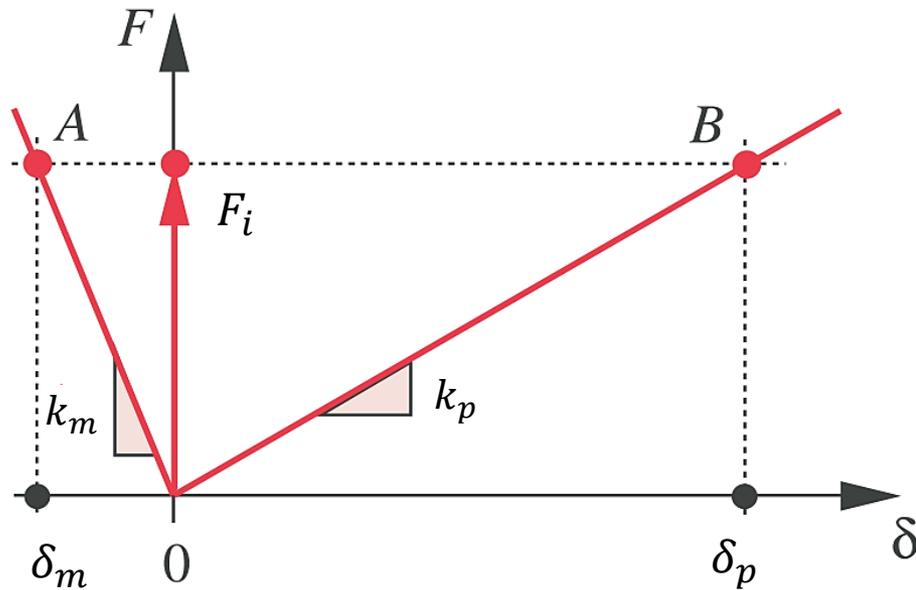
$$k_m = \frac{0,5774\pi E d}{2 \ln \left( 5 \frac{0,5774L + 0,5d}{0,5774L + 2,5d} \right)}$$



# Parafusos com pré-tensão - pré-tensão $F_i$

Capítulo 5

Para uma dada pré-tensão  $F_i$ ,  
o parafuso alonga-se  $\delta_p$   
e as peças ligadas comprimem-se  $\delta_m$



$$\delta_p = \frac{F_i}{k_p}$$

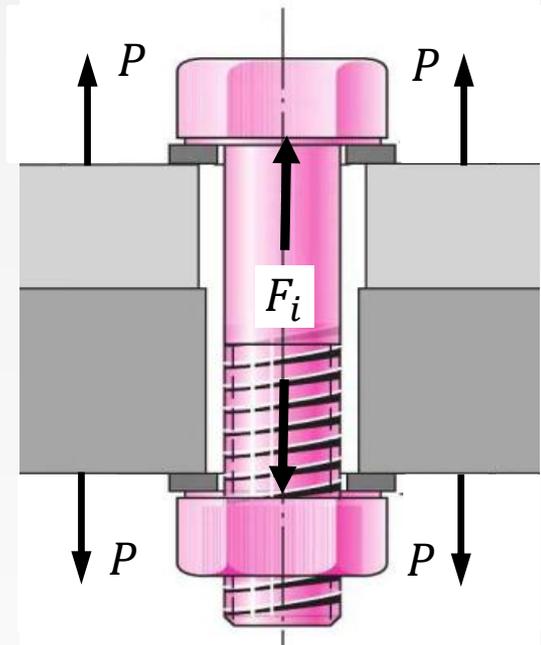
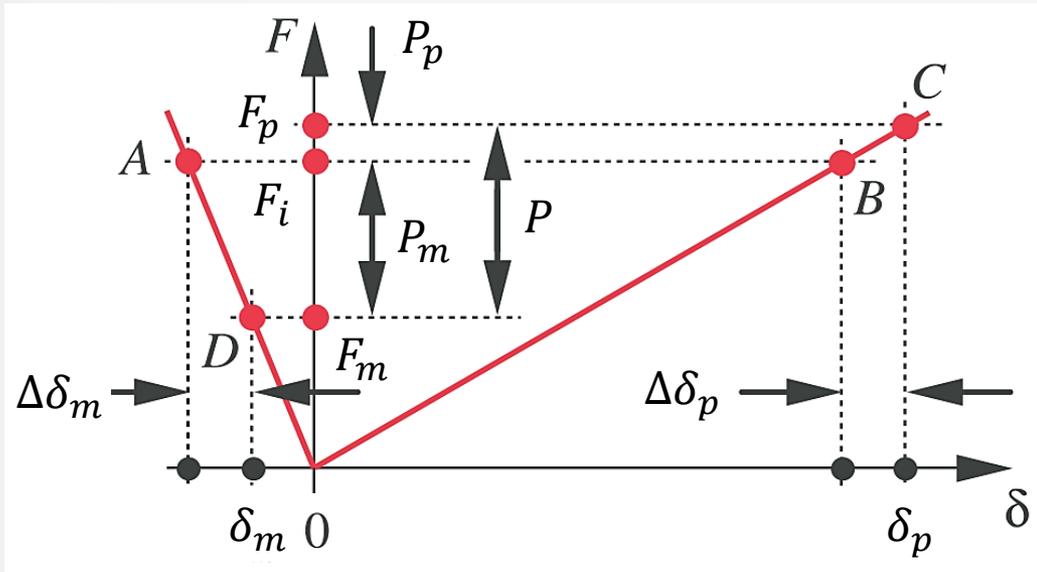
$$\delta_m = \frac{F_i}{k_m}$$



# Parafusos com pré-tensão - Força Exterior $P$

Ao aplicar uma força exterior  $P$  as peças, esta distribui-se pelo parafuso e pelas peças ligadas.

$$P = P_p + P_m$$



A diminuição de deformação nas peças

$$\Delta\delta_m = \frac{P_m}{k_m}$$

O aumento de deformação no parafuso

$$\Delta\delta_p = \frac{P_p}{k_p}$$



# Parafusos com pré-tensão - Força Exterior $P$

Enquanto não houver separação das peças temos:

$$\Delta\delta_p = \Delta\delta_m \Rightarrow \frac{P_p}{k_p} = \frac{P_m}{k_m} \quad (1)$$

como,

$$P = P_p + P_m \quad (2)$$

de (1) e (2) temos,

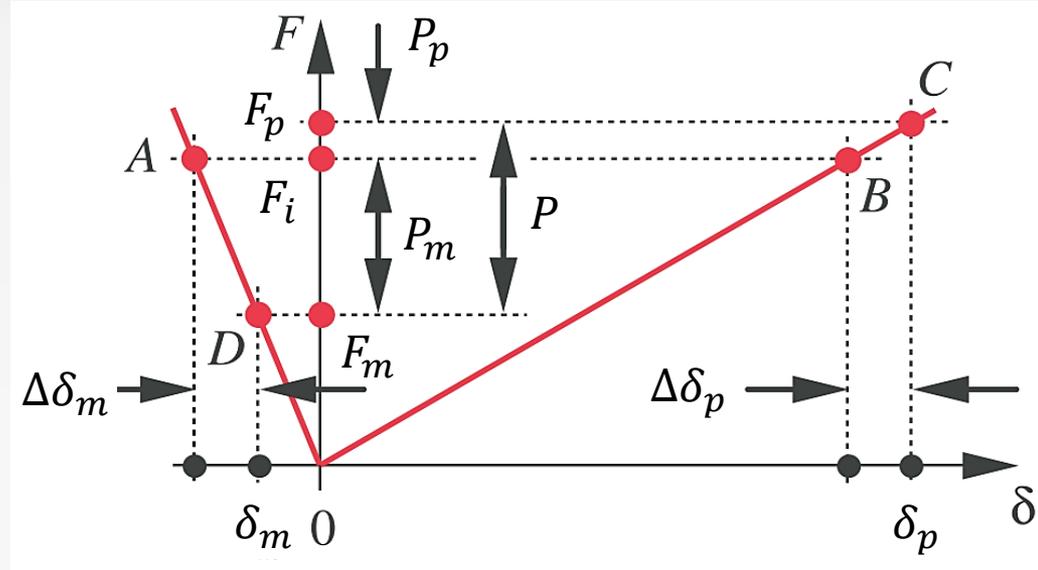
$$P_p = \frac{k_p P}{k_p + k_m} \text{ ou } P_p = CP$$

Constante da junta

$$C = \frac{k_p}{k_p + k_m}$$

A carga de tração no parafuso,

$$F_p = F_i + P_p \Rightarrow F_p = F_i + CP$$



de (1) e (2) também temos,  $P_m = \frac{k_m}{k_p + k_m} P$

$$\frac{k_m}{k_p + k_m} = \frac{k_p + k_m}{k_p + k_m} - \frac{k_p}{k_p + k_m} = 1 - C$$

A carga de compressão nas peças,

$$F_m = F_i - P_m \Rightarrow F_m = F_i - (1 - C)P$$



# Parafusos com pré-tensão - Força Exterior $P$

Separação entre o parafuso e as peças,

$$\begin{aligned} \text{se } F_m = 0 &\Rightarrow F_i = P_m \\ &\Rightarrow F_i = P(1 - C) \end{aligned}$$

Ou seja:

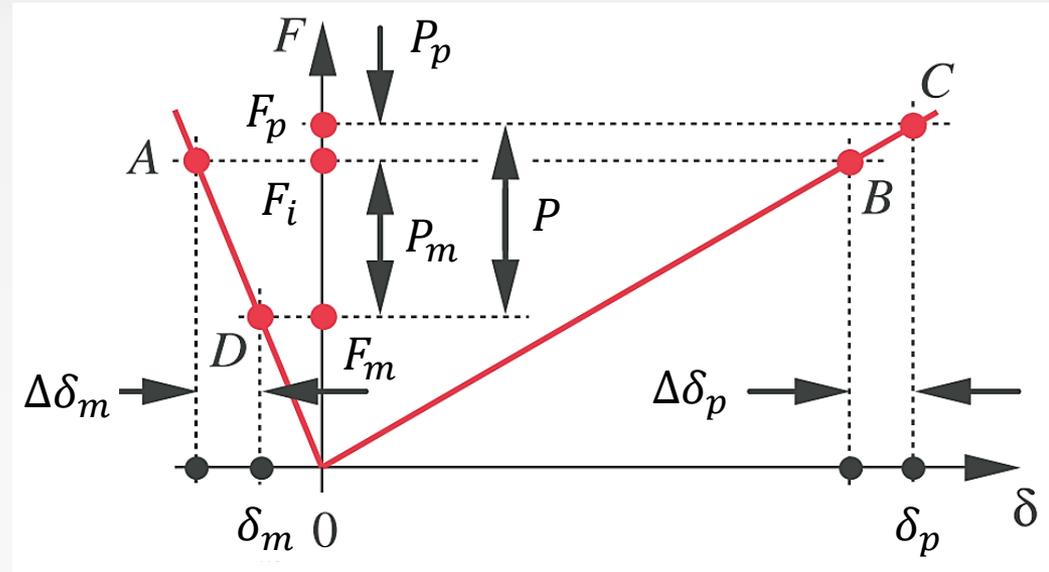
- Para **não haver separação das peças**, a pré-tensão tem que ser maior que

$$F_i > P(1 - C)$$

- A carga  $P_0$  requerida para separar as peças,

$$P > P_0 = \frac{F_i}{(1 - C)}$$

a carga  $P$  será suportada apenas pelo parafuso



Usando um coeficiente de segurança,  $n_p$

$$P \Rightarrow n_p P$$

Temos a força de pré-tensão

$$F_i = n_p P(1 - C)$$

e temos a força total no parafuso

$$F_p = F_i + C n_p P$$



# Parafusos com pré-tensão - Força Exterior $P$

## Cargas máximas recomendadas para a pré-tensão

$$F_i = 0,75 \cdot A_t \cdot \sigma_p \text{ - Para ligações Não Permanentes}$$

$$F_i = 0,90 \cdot A_t \cdot \sigma_p \text{ - Para ligações Permanentes}$$

Para outros materiais pode usar-se

$$\sigma_p = 0,85 \cdot \sigma_c$$

$\sigma_p$  - Tensão de prova

Tabela 3. 4 – Classificação de resistência para os parafusos de classe métrica

Classe métrica	Gama de dimensões	Tensão de prova [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Material	Designação no parafuso
4.6	M5-M36	225	400	240	Aço – Baixo teor de carbono	
4.8	M1,6-M16	310	420	340	Aço – Baixo teor de carbono	

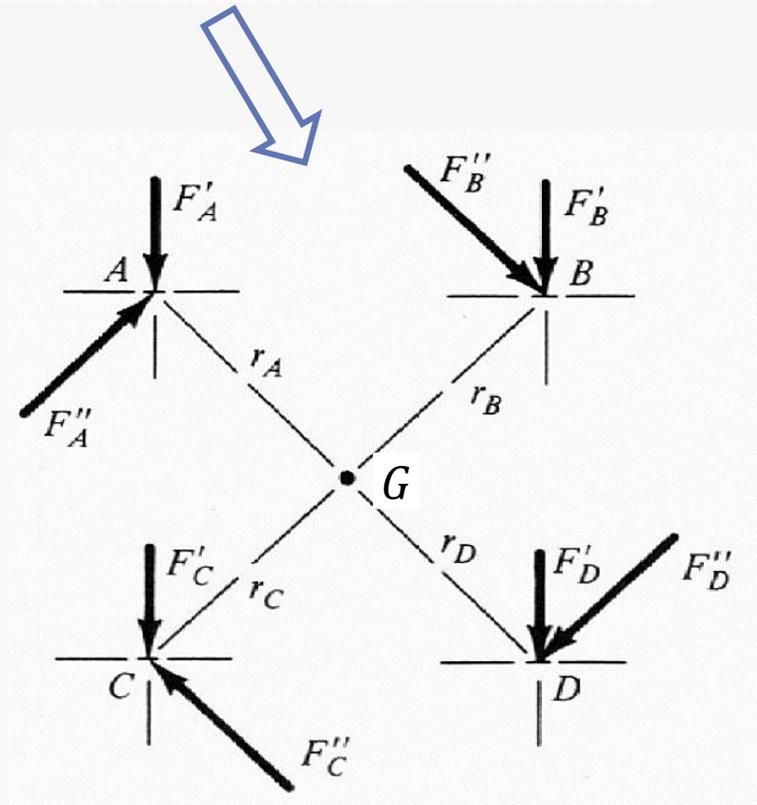
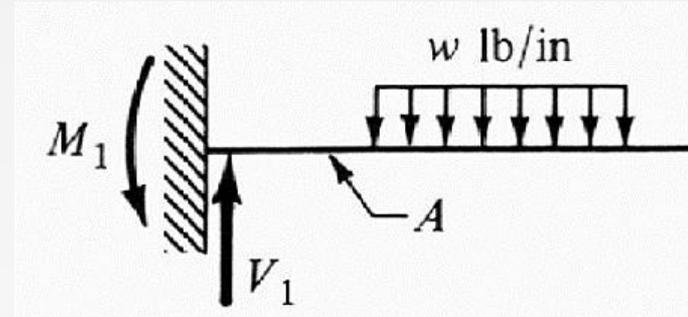
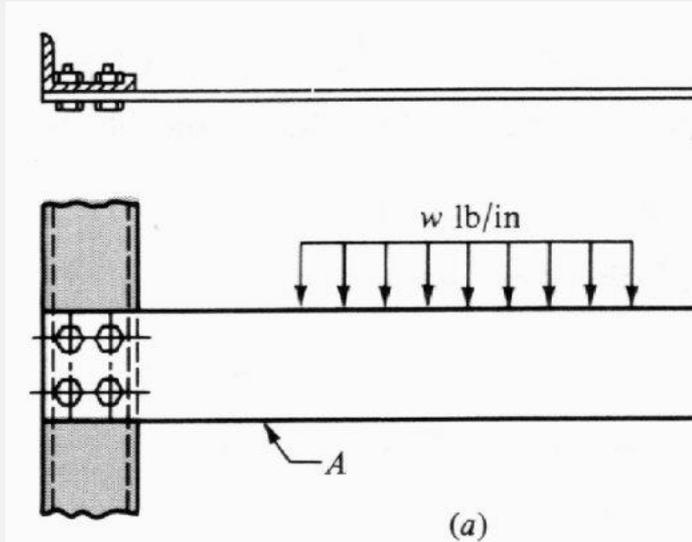
## Dimensionamento do parafuso

$$\sigma = \frac{F_p}{A_t} < \sigma_p \Rightarrow F_i + C n_p P < \sigma_p A_t$$



# Parafusos carregados excêntricamente

Capítulo 5



Corte primário

$$\vec{F}'_i = \frac{\vec{Q}}{n} = (F'_{ix}; F'_{iy})$$

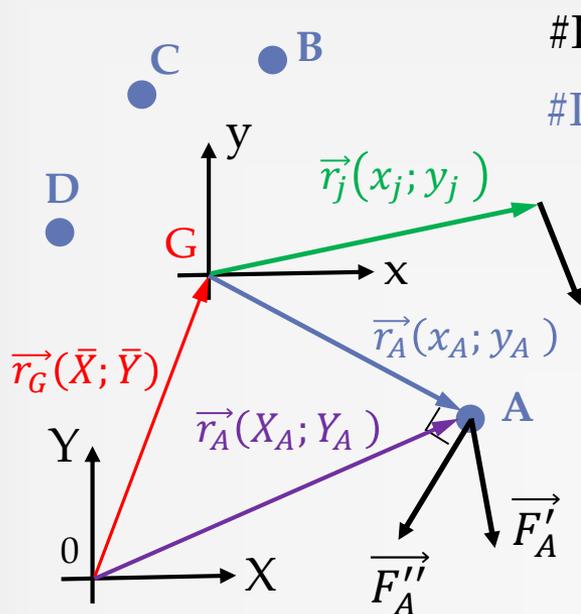
Corte secundário

provocado pelo momento

$$\vec{F}''_i (F''_{ix}; F''_{iy})$$



# Parafusos carregados excetricamente



#Forças:  $j = 1, 2, 3, \dots$

#Parafusos ( $n$ ):  $i = A, B, C, \dots$

## Corte primário

$$\vec{F}'_i = \frac{\vec{Q}}{n} = (F'_{ix}; F'_{iy})$$

$\vec{P}_j(P_{jx}; P_{jy})$  - Forças externas

$$\vec{Q}(Q_x; Q_y) = \sum \vec{P}_j$$
 - Esforço cortante total

$$M_j = (P_{jy}x_j - P_{jx}y_j)$$
 - Momento de cada força

$$M_G = \sum M_j$$
 - Momento Resultante

G - centro geométrico

$$\bar{X} = \frac{\sum A_i X_i}{\sum A_i}$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum A_i Y_i}{\sum A_i}$$

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$
 - Distancia do parafuso ao ponto G

$$F''_i = \frac{M_G \cdot r_i}{\sum r_i^2}$$

$$F''_{ix} = -\frac{F''_i}{r_i} y_i$$

$$F''_{iy} = \frac{F''_i}{r_i} x_i$$

## Corte secundário

$$\vec{F}''_i(F''_{ix}; F''_{iy})$$

$$F_i = \sqrt{(F'_{ix} + F''_{ix})^2 + (F'_{iy} + F''_{iy})^2}$$
 - Força Resultante



# Parafusos carregados excetricamente

## Parafusos

$i$	$A_i$	$(X_i; Y_i)$	$(x_i; y_i)$	$r_i$	$r_i^2$	$(F'_{ix}; F'_{iy})$	$F''_i$	$(F''_{ix}; F''_{iy})$	$F_i$
$A$									
$B$									
	$\Sigma$				$\Sigma$				

## Forças

$j$	$(x_j; y_j)$	$(P_{jx}; P_{jy})$	$M_j$
$P_1$			
$P_2$			
		$\Sigma$	$\Sigma$
		$\vec{Q}(Q_x; Q_y)$	$M_G$