



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**EM608 – Elementos de Máquinas
ES690 – Sistemas Mecânicos**

JUNÇÕES

Parafusos de Fixação

Prof. Gregory Bregion Daniel gbdaniel@fem.unicamp.br

Prof.^a Katia Lucchesi Cavalca katia@fem.unicamp.br

Campinas, 2º semestre 2020



FORMAS PADRONIZADAS DE ROSCAS

O elemento comum entre os vários parafusos de fixação é a rosca. Em termos gerais, a rosca é uma hélice que faz com que o parafuso avance sobre o material ou porca quando rotacionado. As roscas podem ser interna ou externa.

As formas de roscas originalmente eram diferentes para cada um dos principais países fabricantes, porém, após a Segunda Guerra Mundial, foram padronizadas na Inglaterra, Canadá e nos Estados Unidos no que hoje se conhece como série Unified National Standard (UNS).

O padrão europeu é definido pela ISO e tem a mesma forma de seção transversal de rosca, usando porém dimensões métricas e, portanto, não é intercambiável com as roscas UNS.



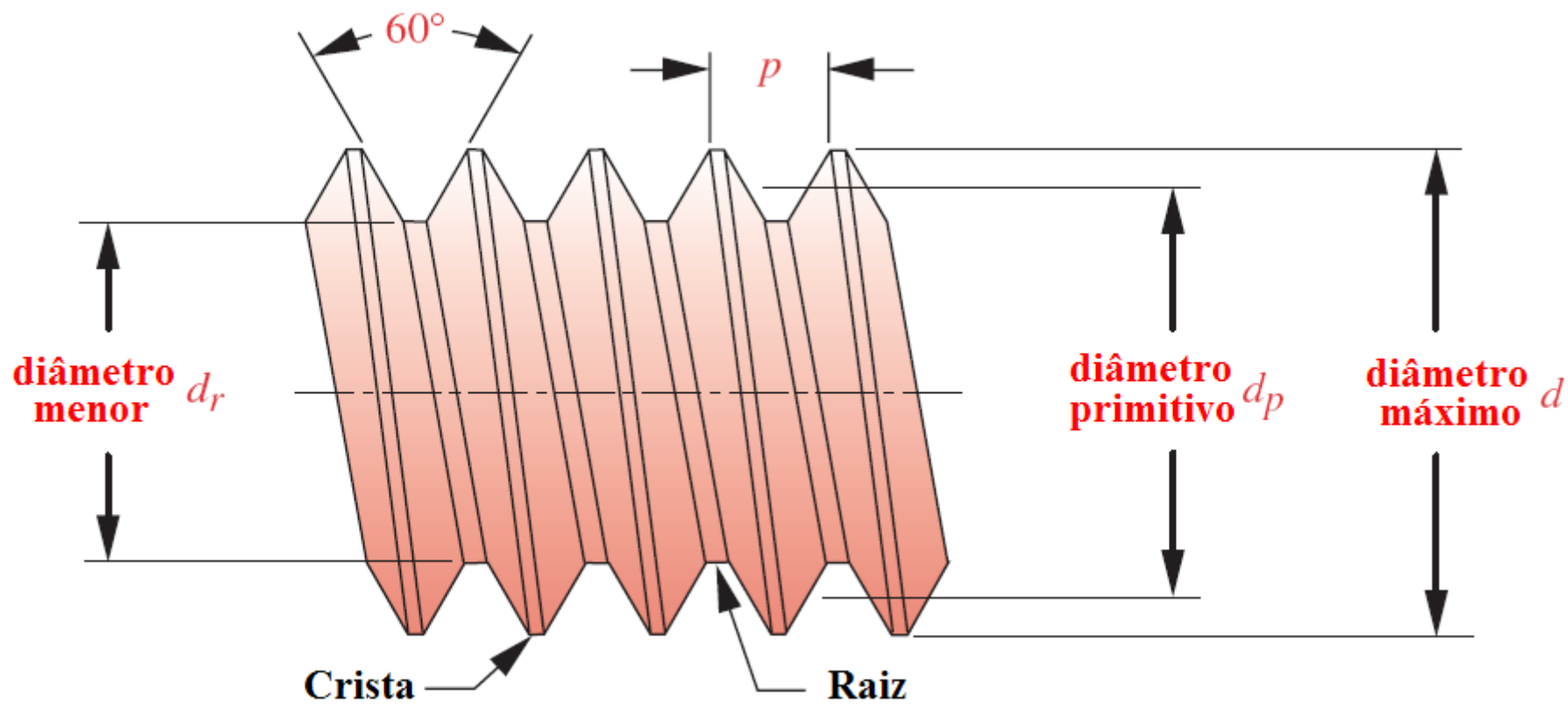


Figura 1 – Formas de rosca-padrão UNS e ISO.



Área sob tração

Se uma barra rosqueada, como mostrado na figura 1, é submetida a uma carga de tração pura, é de se esperar que sua resistência seja limitada pela área de menor diâmetro. Contudo, testes de barras rosqueadas sob tração mostram que a sua resistência à tração é melhor definida como:

$$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_p + d_r}{2} \right)^2 \quad \text{Onde } A_t \text{ é a área sob tração}$$

$$\text{UNS: } d_p = d - 0,649519 / N \quad d_r = d - 1,299038 / N$$

$$\text{ISO: } d_p = d - 0,649519 \cdot p \quad d_r = d - 1,226869 \cdot p$$

Onde d é o diâmetro externo ou nominal, N é o número de filetes por polegada e p é o passo em milímetros.

Portanto, obtém-se:

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



Dimensões padronizadas de roscas: UNS e ISO

Tabela 1 – Principais dimensões de roscas de parafusos UNS

Tamanho	Diâmetro Maior d (in)	Roscas Grossas UNC			Roscas Finas UNF		
		Rosca por polegada	Diâmetro Menor dr (in)	Área sob tração At (in²)	Rosca por polegada	Diâmetro Menor dr (in)	Área sob tração At (in²)
0	0.0600	–	–	–	80	0.0438	0.0018
1	0.0730	64	0.0527	0.0026	72	0.0550	0.0028
2	0.0860	56	0.0628	0.0037	64	0.0657	0.0039
3	0.0990	48	0.0719	0.0049	56	0.0758	0.0052
4	0.1120	40	0.0795	0.0060	48	0.0849	0.0066
5	0.1250	40	0.0925	0.0080	44	0.0955	0.0083
6	0.1380	32	0.0974	0.0091	40	0.1055	0.0101
8	0.1640	32	0.1234	0.0140	36	0.1279	0.0147
10	0.1900	24	0.1359	0.0175	32	0.1494	0.0200
12	0.2160	24	0.1619	0.0242	28	0.1696	0.0258
1/4	0.2500	20	0.1850	0.0318	28	0.2036	0.0364
5/16	0.3125	18	0.2403	0.0524	24	0.2584	0.0581
3/8	0.3750	16	0.2938	0.0775	24	0.3209	0.0878
7/16	0.4375	14	0.3447	0.1063	20	0.3725	0.1187
1/2	0.5000	13	0.4001	0.1419	20	0.4350	0.1600
9/16	0.5625	12	0.4542	0.1819	18	0.4903	0.2030
5/8	0.6250	11	0.5069	0.2260	18	0.5528	0.2560
3/4	0.7500	10	0.6201	0.3345	16	0.6688	0.3730
7/8	0.8750	9	0.7307	0.4617	14	0.7822	0.5095
1	1.0000	8	0.8376	0.6057	12	0.8917	0.6630
1 1/8	1.1250	7	0.9394	0.7633	12	1.0167	0.8557
1 1/4	1.2500	7	1.0644	0.9691	12	1.1417	1.0729
1 3/8	1.3750	6	1.1585	1.1549	12	1.2667	1.3147
1 1/2	1.5000	6	1.2835	1.4053	12	1.3917	1.5810
1 3/4	1.7500	5	1.4902	1.8995			
2	2.0000	4.5	1.7113	2.4982			
2 1/4	2.2500	4.5	1.9613	3.2477			
2 1/2	2.5000	4	2.1752	3.9988			
2 3/4	2.7500	4	2.4252	4.9340			
3	3.0000	4	2.6752	5.9674			
3 1/4	3.2500	4	2.9252	7.0989			
3 1/2	3.5000	4	3.1752	8.3286			
3 3/4	3.7500	4	3.4252	9.6565			
4	4.0000	4	3.6752	11.0826			



Tabela 2 – Principais dimensões de roscas de parafusos ISO

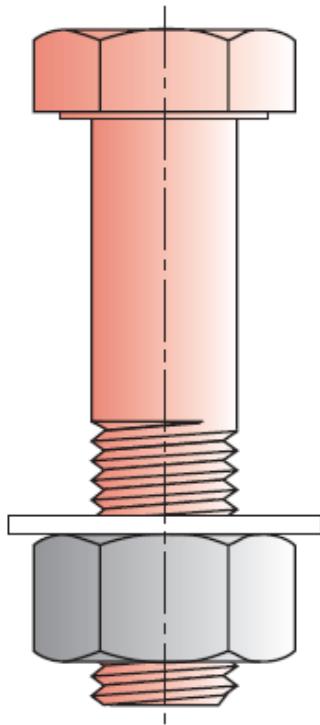
Diâmetro Maior d (mm)	Roscas Grossas			Roscas Finas		
	Passo p mm	Diâmetro Menor dr (mm)	Área sob tração At (mm ²)	Passo p mm	Diâmetro Menor dr (mm)	Área sob tração At (mm ²)
3.0	0.50	2.39	5.03			
3.5	0.60	2.76	6.78			
4.0	0.70	3.14	8.78			
5.0	0.80	4.02	14.18			
6.0	1.00	4.77	20.12			
7.0	1.00	5.77	28.86			
8.0	1.25	6.47	36.61	1.00	6.77	39.17
10.0	1.50	8.16	57.99	1.25	8.47	61.20
12.0	1.75	9.85	84.27	1.25	10.47	92.07
14.0	2.00	11.55	115.44	1.50	12.16	124.55
16.0	2.00	13.55	156.67	1.50	14.16	167.25
18.0	2.50	14.93	192.47	1.50	16.16	216.23
20.0	2.50	16.93	244.79	1.50	18.16	271.50
22.0	2.50	18.93	303.40	1.50	20.16	333.06
24.0	3.00	20.32	352.50	2.00	21.55	384.42
27.0	3.00	23.32	459.41	2.00	24.55	495.74
30.0	3.50	25.71	560.59	2.00	27.55	621.20
33.0	3.50	28.71	693.55	2.00	30.55	760.80
36.0	4.00	31.09	816.72	3.00	32.32	864.94
39.0	4.00	34.09	975.75	3.00	35.32	1028.39



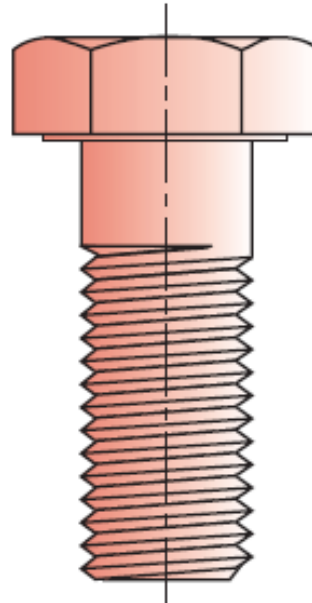
TIPOS DE PARAFUSOS DE FIXAÇÃO

Classificação a partir do uso pretendido:

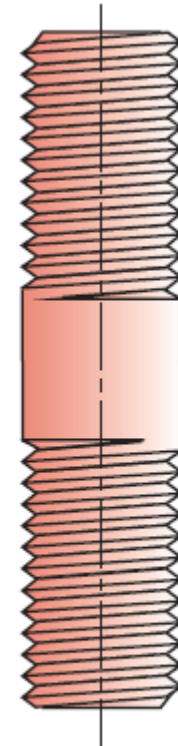
- Parafusos de fixação.
- Parafusos de ajuste em máquinas.
- Parafusos prisioneiros.



(a) Parafuso de fixação



(b) Parafuso de ajustagem
em máquinas



(c) Parafuso prisioneiro

Figura 2 – Parafuso de porca, parafuso de máquina e prisioneiro.



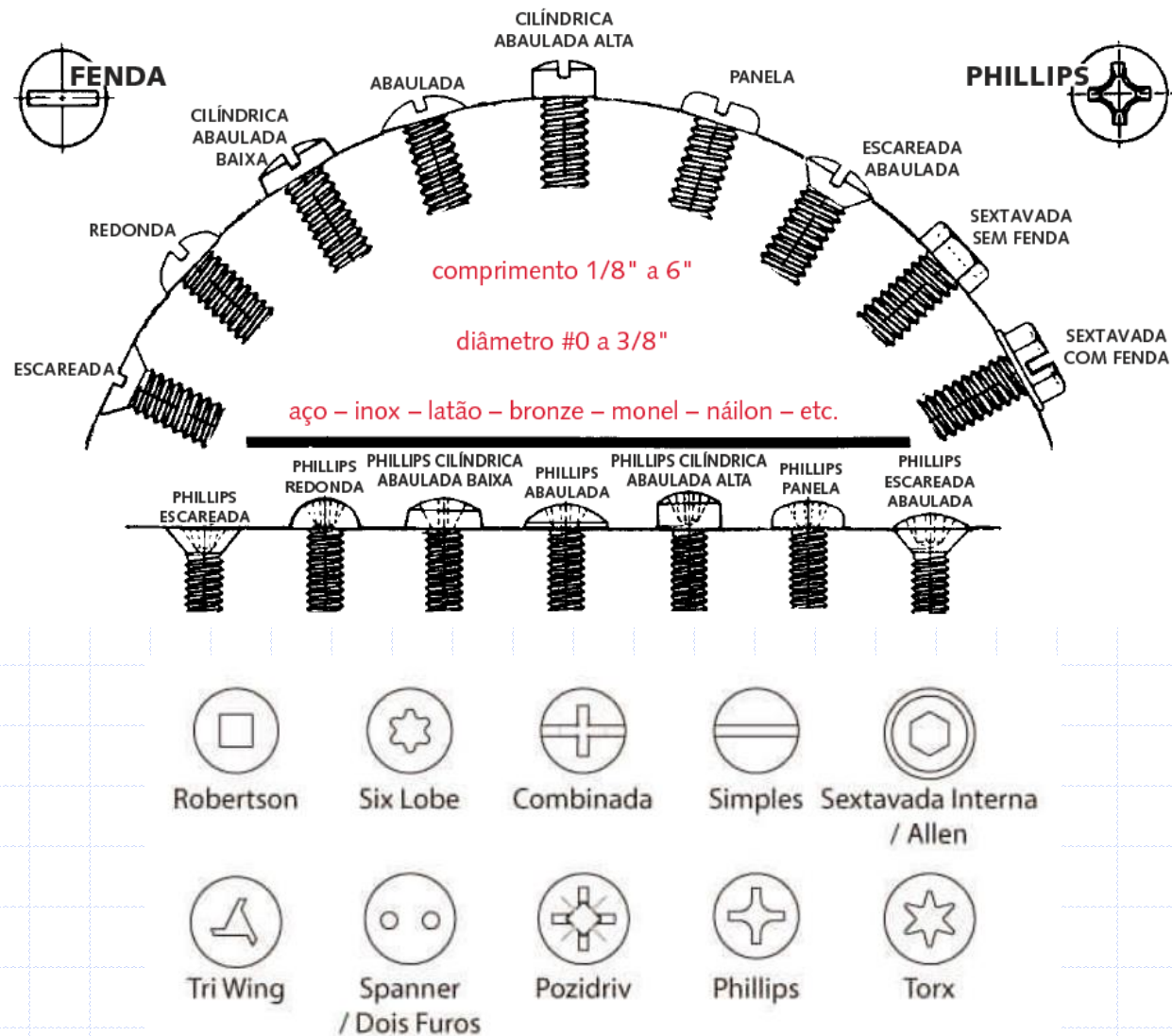


Figura 3 – Tipos de cabeças de parafusos.





(a) Porca hexagonal padronizada ou sextavada



(b) Porca hexagonal de pressão



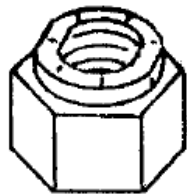
(c) Porca hexagonal de castelo



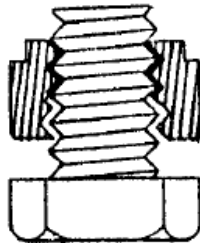
(d) Porca hexagonal de cúpula ou cega



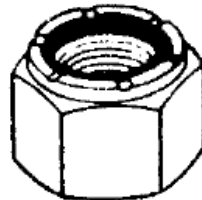
(e) Porca de borboleta



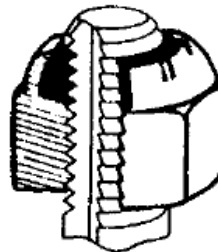
(a) Porca de travamento elíptica



(b) Porca de travamento com inserto de náilon



(c) Porca de travamento por pino



(d) Porca de travamento com flange

Figura 4 – Tipos de porcas.



Resistências de Parafusos Padronizados

SAE, ASTM e ISO definem graus ou classes para parafusos, que especificam material, tratamento térmico e uma resistência de prova. Resistência de prova é a tensão sob a qual o parafuso começa a apresentar deformação permanente.

Tabela 3 – Especificações métricas ISO e resistências de parafusos de aço.

Número de Classe	Faixa do diâmetro externo [mm]	Resistência de Prova Mínima [MPa]	Limite de Escoamento Mínimo [MPa]	Resistência a Tração Mínima [MPa]
4.6	M5-M36	225	240	400
4.8	M1.6-M16	310	340	420
5.8	M5-M24	380	420	520
8.8	M16-M36	600	660	830
9.8	M1.6-M16	650	720	900
10.9	M5-M36	830	940	1040
12.9	M1.6-M36	970	1100	1220



Tabela 4 – Especificações SAE e resistências de parafusos de aço.

Número de graduação SAE	Faixa do diâmetro externo [in]	Resistência de Prova Mínima [kpsi]	Limite de Escoamento Mínimo [kpsi]	Resistência a Tração Mínima [kpsi]
1	0.25-1.5	33	36	60
2	0.25-0.75	55	57	74
2	0.875-1.5	33	36	60
4	0.25-1.5	65	100	115
5	0.25-1.0	85	92	120
5	1.125-1.5	74	81	105
5.2	0.25-1.0	85	92	120
7	0.25-1.5	105	115	133
8	0.25-1.5	120	130	150
8.2	0.25-1.0	120	130	150



Pré-Carga de Junções em Tração

Uma das aplicações básicas de parafusos e porcas é a junção rígida de peças, em situações tais que as cargas aplicadas colocam o parafuso em tração, conforme mostrado a seguir:

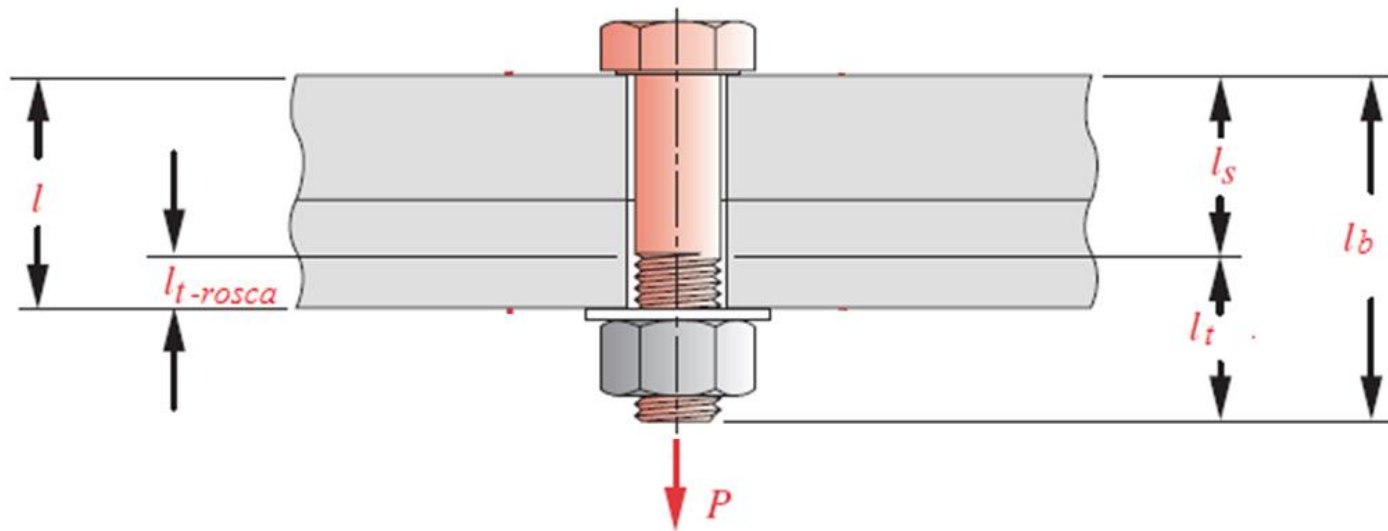


Figura 3 - Montagem parafusada em tração.



É prática comum pré-carregar a junta apertando os parafusos com suficiente torque para criar cargas de tração que se aproximam às respectivas resistências de provas.

Para montagens carregadas de forma estática, uma pré-carga de até 90% da resistência de prova é recomendada.

Para juntas carregadas dinamicamente, uma pré-carga de 75% ou mais da resistência de prova é indicada.

A figura 4 mostra um parafuso de fixação num cilindro de seção transversal e comprimento conhecidos.



Comprimentos do parafuso:

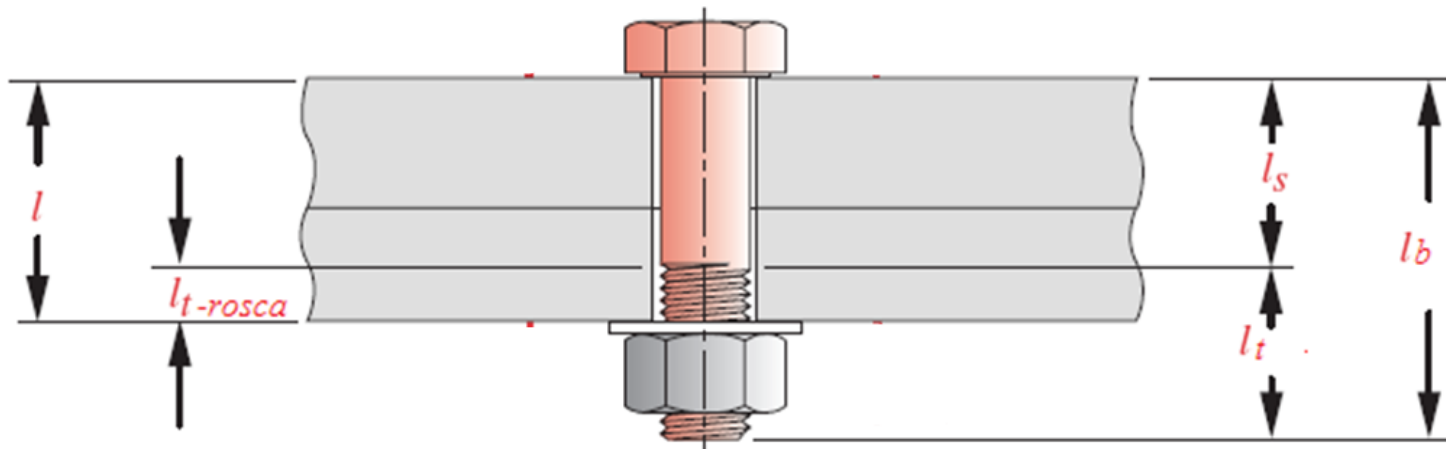
$l_b = l + 1/2 \text{ (in)}$ para montagem da porca

$l_t = 2d + 1/4 \text{ (in)}$ para $l_b \leq 6 \text{ in}$

$l_t = 2d + 1/2 \text{ (in)}$ para $l_b > 6 \text{ in}$

$l_s = l_b - l_t$ comprimento da parte lisa

$l_{t-rosca} = l - l_s$ comprimento da rosca dentro da junta



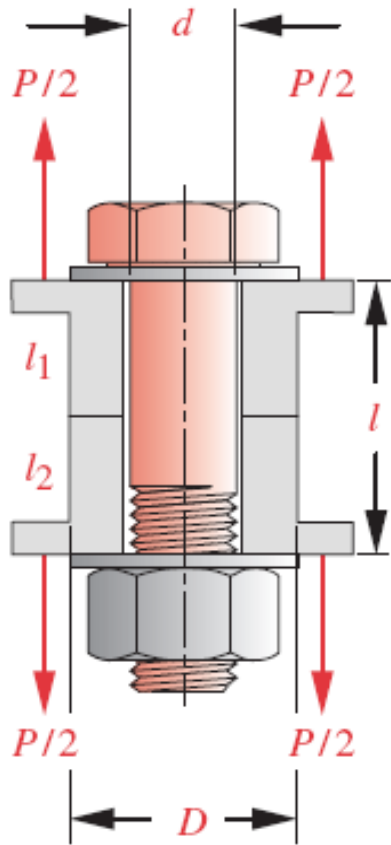


Figura 4 –
Parafuso pré-carregado unindo flanges de um cilindro ao qual cargas externas são aplicadas.

A constante de mola de uma barra em tração é encontrada a partir da equação de deflexão de uma barra de tração:

$$\delta = \frac{F \cdot l}{A \cdot E} \quad \rightarrow \quad k = \frac{F}{\delta} = \frac{A \cdot E}{l}$$

O material do parafuso submetido à tração contém duas ou mais seções de diferentes geometrias. Essas seções atuam como molas em série:

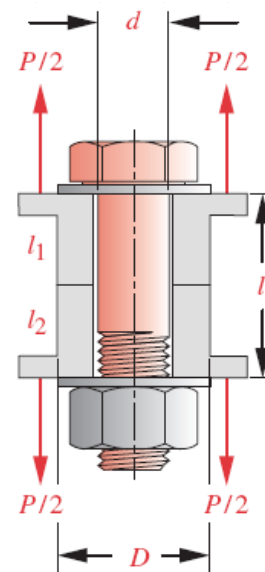
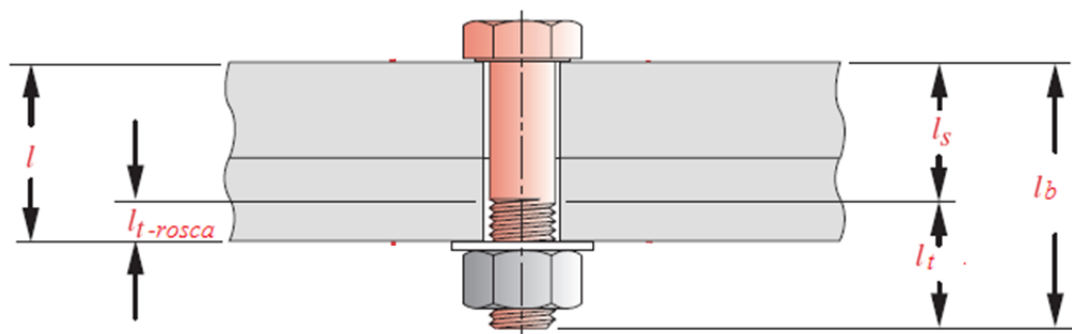
$$\frac{1}{k_{total}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n}$$



Para um parafuso de diâmetro d e comprimento de rosca l_t carregada axialmente, dentro do comprimento total l , a constante de mola é:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{l_{t-rosca}}{A_t \cdot E_b} + \frac{l_b - l_t}{A_b \cdot E_b} = \frac{l_{t-rosca}}{A_t \cdot E_b} + \frac{l_s}{A_b \cdot E_b}$$

Onde A_b é a área total de seção lisa, A_t é a área rosqueada, ambas sob tensão de tração do parafuso e $l_s = l - l_t$ é o comprimento sem rosca.



$$\frac{1}{k_m} = \frac{l_1}{A_{m1} \cdot E_1} + \frac{l_2}{A_{m2} \cdot E_2} = \frac{4l_1}{\pi(D_{ef1}^2 - d^2) \cdot E_1} + \frac{4l_2}{\pi(D_{ef2}^2 - d^2) \cdot E_2}$$

Onde A_m é a área efetiva dos materiais da junção e D_{ef} é o diâmetro efetivo da área tracionada.

Definindo A_m como um cilindro sólido com diâmetro externo D e diâmetro interno d , então:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{4l}{\pi(D^2 - d^2) \cdot E_m}$$



Para placas, o diâmetro efetivo é uma média entre os diâmetros aproximados das áreas do material em compressão efetiva, conforme o esquema abaixo.

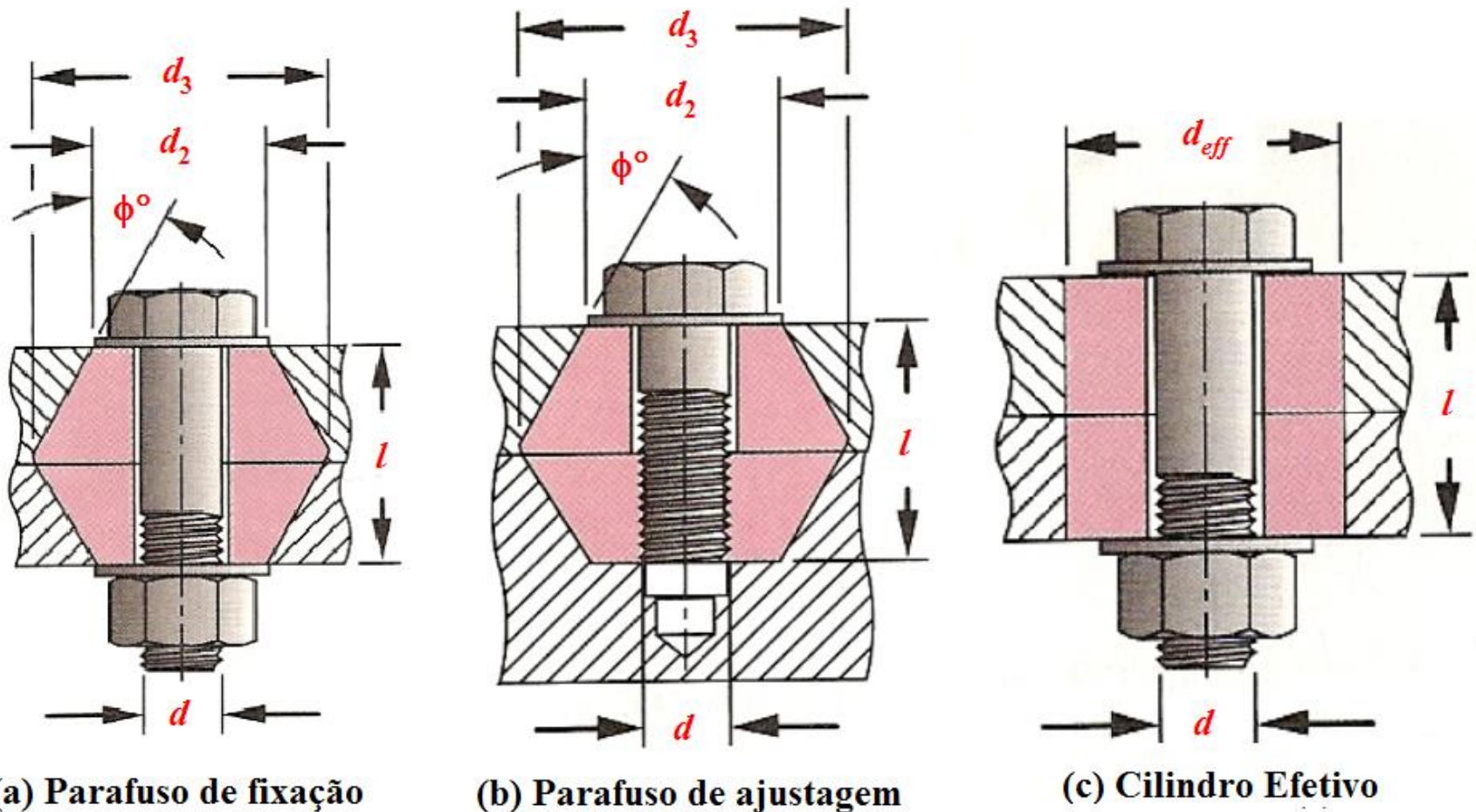
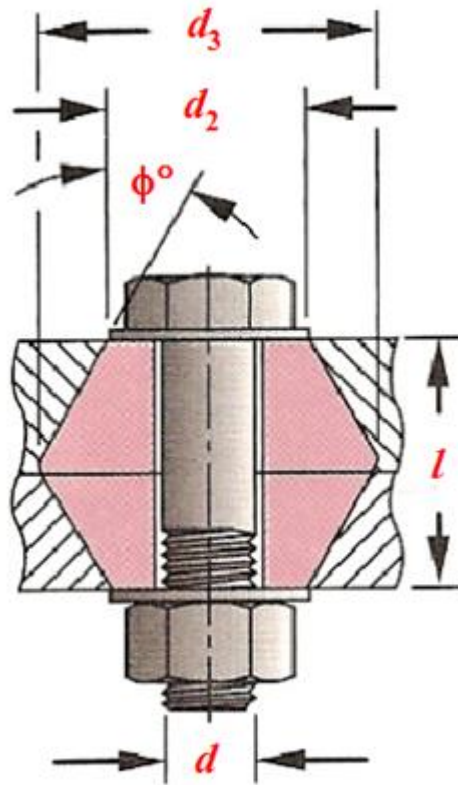


Figura 5 – Estimativa do material comprimido pelo parafuso.



O valor padrão de d_2 é proporcional ao diâmetro nominal do parafuso:



(a) Parafuso de fixação

$$d_2 = 2,0.d$$

$$d_3 = d_2 + l \cdot \tan \phi \quad \phi = 30^\circ$$

$$D_{eff} = \frac{d_2 + d_3}{2}$$

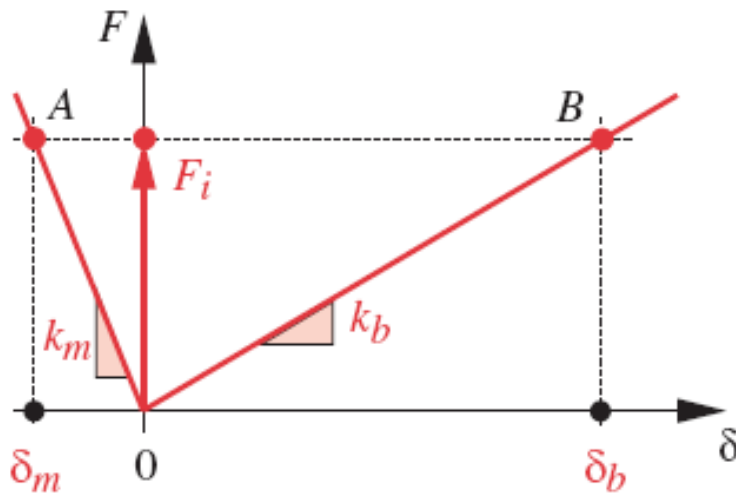
Neste caso, a área efetiva do material é:

$$A_m = \frac{\pi(D_{eff}^2 - d^2)}{4}$$

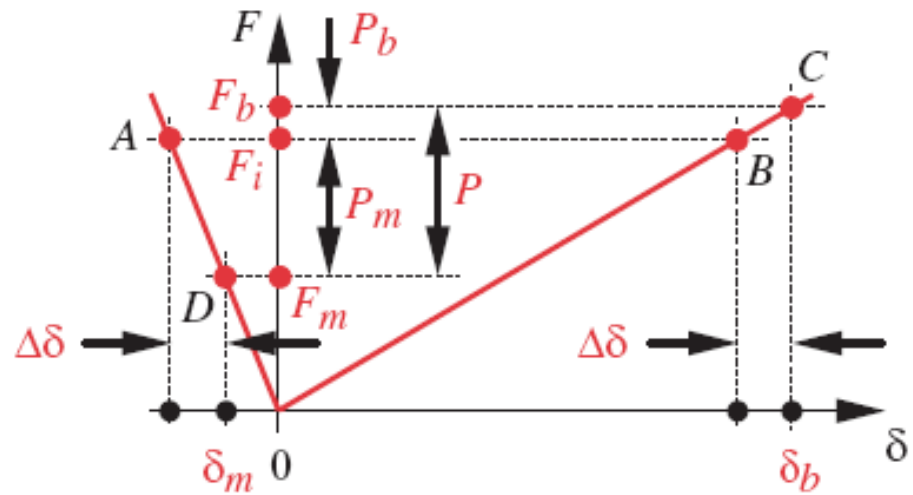


Parafusos pré-carregados sob carga estática

A figura 6 mostra o comportamento carga-deflexão de ambos, parafuso e material, com o comprimento inicial tomado como deflexão δ zero.



(a) Força de pré-carregamento e deflexões iniciais.



(b) Carga-deflexão e forças resultantes

Figura 6 – Efeitos causados pela pré-carga sobre o parafuso e material.
(a) pré-carga; (b) carga aplicada.



Observe que a inclinação da linha de carga do parafuso é positiva porque seu comprimento aumenta com o aumento da força. A inclinação da linha de carga do material é negativa porque seu comprimento diminui com o aumento da força.

Observe ainda que a carga aplicada P é dividida em duas componentes, uma (P_m) absorvida pelo material e outra (P_b) absorvida pelo parafuso.

$$P = P_m + P_b$$

A carga compressiva F_m no material passa a ser:

$$F_m = F_i - P_m$$

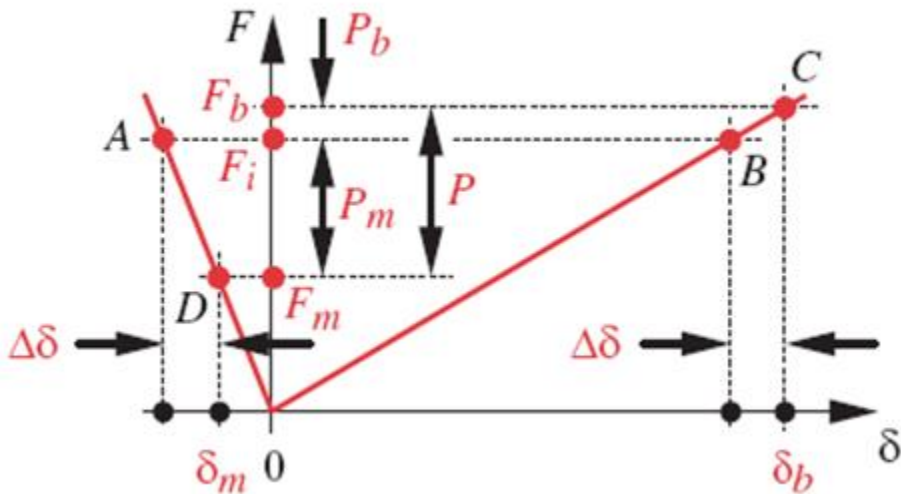
A carga de tração F_b no parafuso se torna:

$$F_b = F_i + P_b$$



A deflexão comum ao parafuso e ao material, $\Delta\delta$, devido a carga aplicada P , e a partir do pré-carregamento F_i , pode ser escrita como:

$$\Delta\delta = \frac{P_b}{k_b} = \frac{P_m}{k_m} \rightarrow P_b = \frac{P_m k_b}{k_m}$$



Ou ainda:

$$P_b = \frac{k_b}{k_m + k_b} P = C.P$$

O termo C é chamado de constante da junta. De maneira semelhante temos:

$$P_m = \frac{k_m}{k_b + k_m} P = (1 - C).P$$



Determinado P_b e P_m , obtemos a expressão da carga no parafuso e no material:

$$F_m = F_i - (1 - C).P$$

$$F_b = F_i + C.P$$

A carga P_0 capaz de separar a junta é:

$$P_0 = \frac{F_i}{1 - C}$$

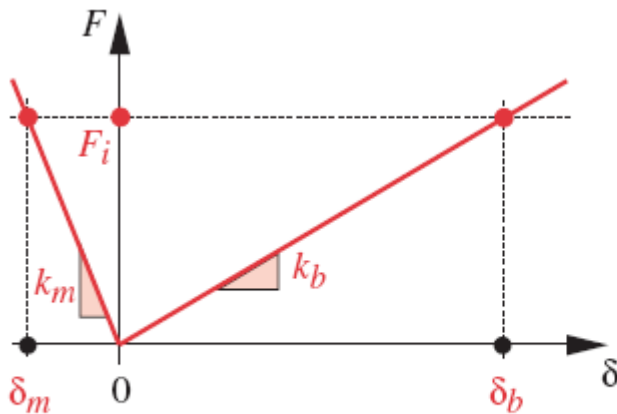
O coeficiente de segurança à falha por separação da junta pode ser encontrado a partir de:

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

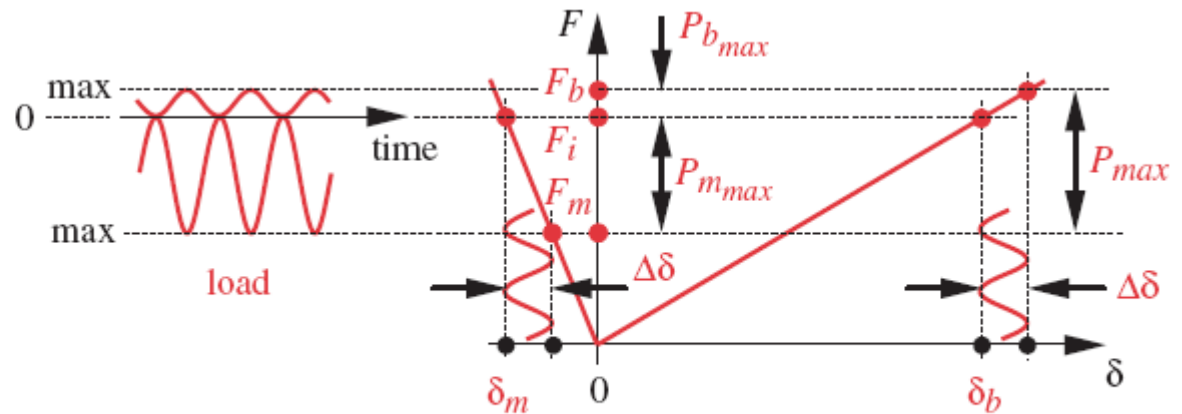


Parafusos pré-carregados sob carga dinâmica

A figura 7 mostra o diagrama carga-deflexão de uma união parafusada submetida a uma carga alternada.



(a) Condição de carga quando $P=0$



(b) Condição de carga quando $P=P_{max}$

Figura 7 – Efeitos no parafuso e material causados por carga variada entre zero e P_{max} .



Quando a força aplicada é nula, o diagrama coincide com a pré-carga estática presente. P_{\max} é dividida entre o parafuso e material da mesma maneira que no caso do carregamento estático.

As forças média e alternada sentidas pelo parafuso são:

$$F_{alt} = \frac{F_b - F_i}{2} \qquad F_{med} = \frac{F_b + F_i}{2}$$

Onde: $F_b = F_i + C.P_{\max}$



As tensões médias e alternadas no parafuso são:

$$\sigma_{alt} = K_f \frac{F_{alt}}{A_t} \qquad \sigma_{med} = K_{fm} \frac{F_{med}}{A_t}$$

Onde A_t é a área sob tensão de tração do parafuso, K_f é o fator de concentração de tensão em fadiga para componente alternada e K_{fm} é o fator de concentração de tensão em fadiga para componente média.

Tabela 5 – fatores de concentração de tensão a fadiga para parafusos.

Dureza Brinell	Grau SAE (UNS)	Classe Métrica (ISO)	K_f Roscas Laminadas	K_f Roscas Cortadas	K_f Filetes
< 200 (recozido)	≤ 2	≤ 5.8	2.2	2.8	2.1
> 200 (endurecido)	≥ 4	≥ 6.6	3.0	3.8	2.3



A tensão resultante da pré-carga F_i é:

$$\sigma_i = K_{fm} \frac{F_i}{A_t}$$

O coeficiente de segurança à falha por fadiga pode ser calculado utilizando a expressão N_{f3} do diagrama de Goodman, adaptada para tensão inicial de pré-carga.

$$N_{f3} = \frac{S_e (S_{ut} - \sigma_i)}{S_e (\sigma_m - \sigma_i) + S_{ut} \cdot \sigma_a}$$



