

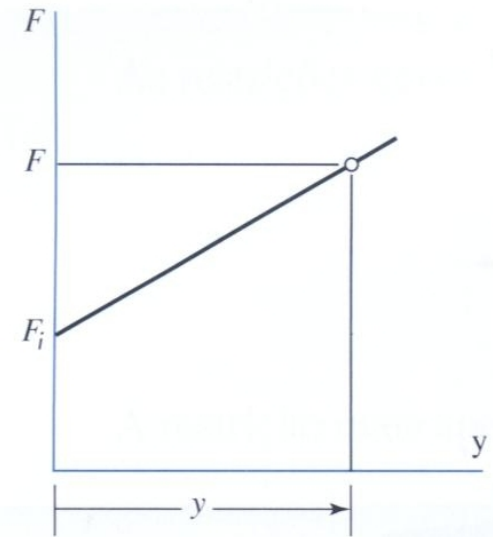
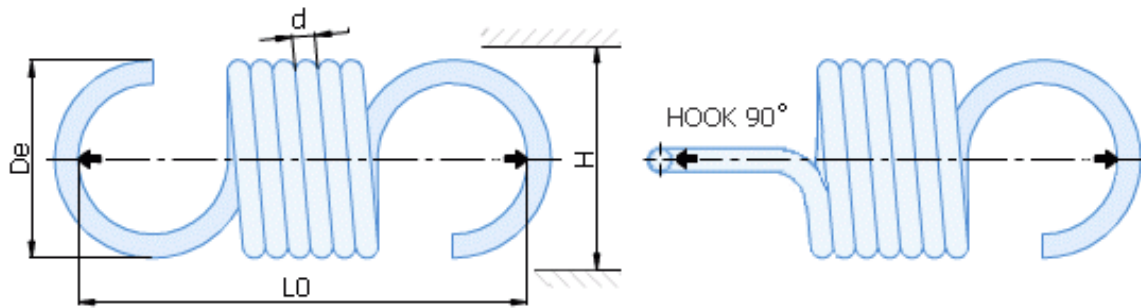
ME355 - Elementos de Máquinas I

MOLAS DE TRAÇÃO



Prof. Julio César de Almeida
Prof. Jorge Luiz Erthal

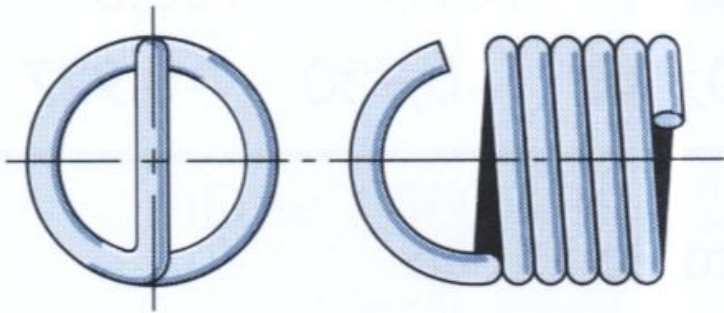
MOLAS DE TRAÇÃO



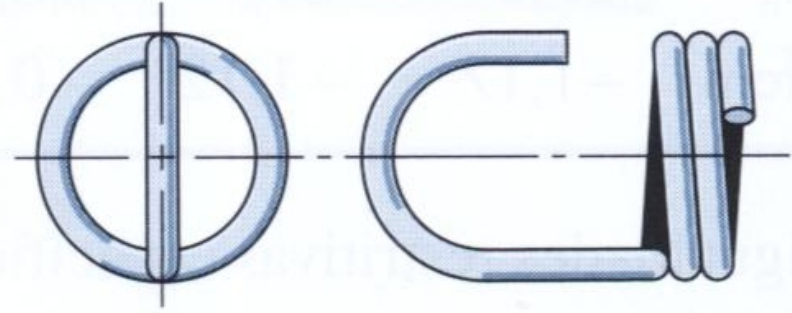
(a)

- apresentam uma tração inicial (corpo comprimido);
- necessitam meios para transferir a carga ao corpo da mola;
- as tensões no corpo da mola são tratadas de maneira idêntica às molas de compressão;
- exigem o dimensionamento da extremidade (flexão e torção no gancho).

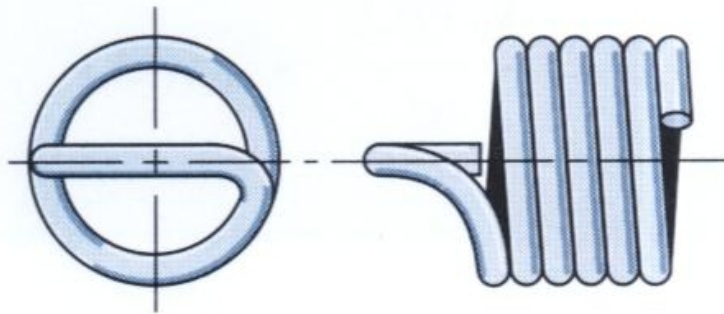
MOLAS DE TRAÇÃO



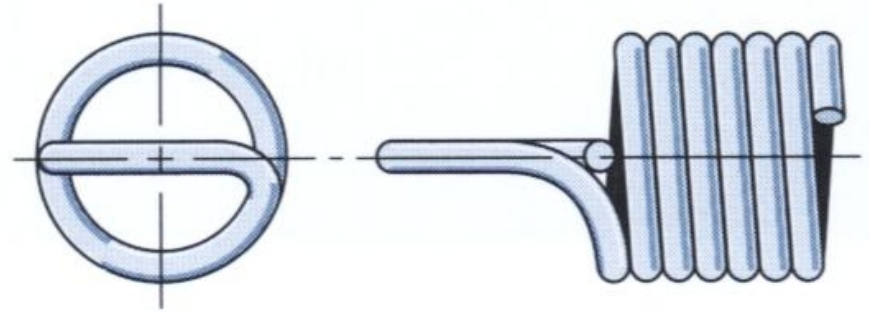
(a) Meio anel aberto padronizado



(b) Gancho levantado



(c) Anel torcido parcialmente



(d) Anel torcido completamente

Figura 10-6: Tipos de extremidade usadas em molas de tração.

MOLAS DE TRACÇÃO

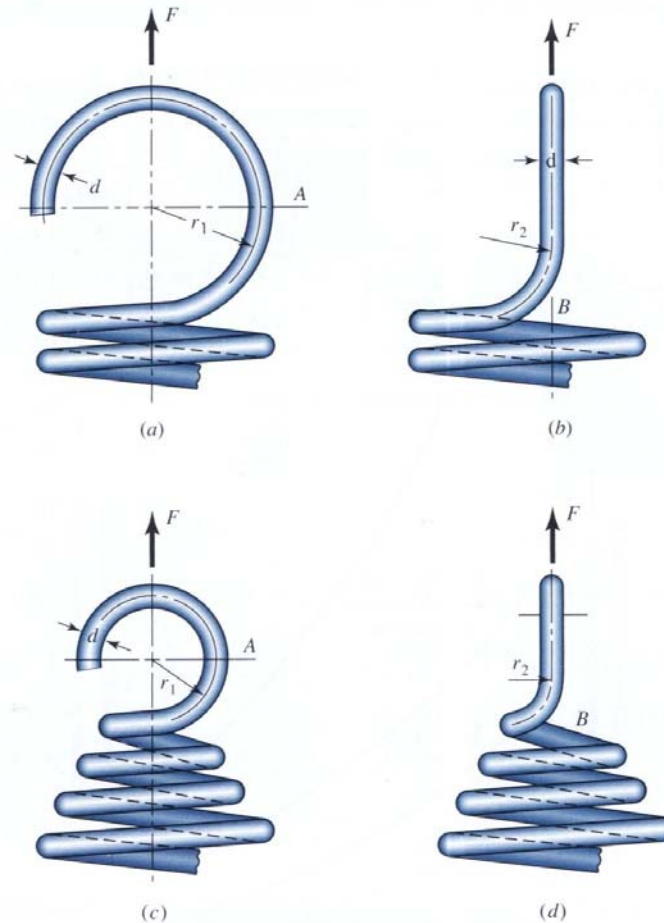


Figura 10-7: Tipos de extremidade usadas em molas de tração:

a) Projeto usual.

b) Vista lateral de (a). Tensões de torção em B.

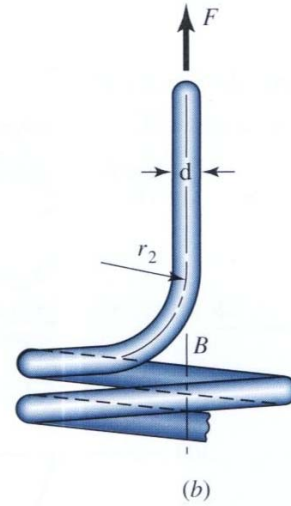
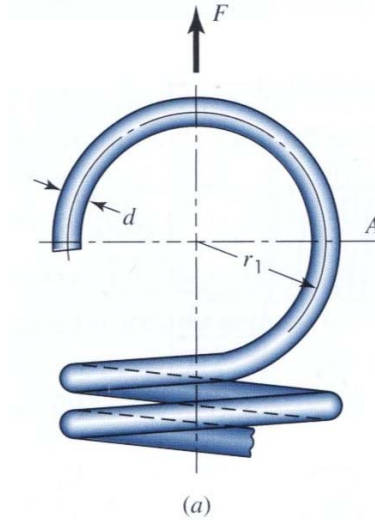
c) Projeto melhorado. Tensões de tração e flexão em A.

d) Vista lateral de (c). Tensões de torção em B.

MOLAS DE TRAÇÃO

Tensão máxima de **tração** em A:

$$\sigma_A = F \left[K_{(A)} \frac{16.D}{\pi.d^3} + \frac{4}{\pi.d^2} \right]$$



Fator de correção da tensão de flexão devido à curvatura:

$$K_{(A)} = \frac{4C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} \quad \text{sendo} \quad C_1 = \frac{2r_1}{d}$$

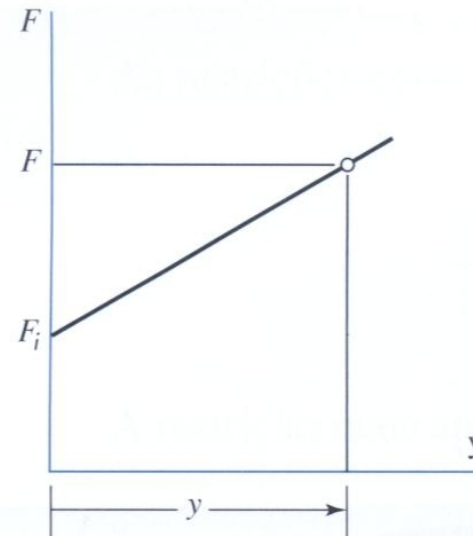
Tensão máxima de **torção** em B:

$$\tau_B = K_{(B)} \cdot \frac{8F.D}{\pi.d^3}$$

$$K_{(B)} = \frac{4C_2 - 1}{4C_2 - 4} \quad \text{sendo} \quad C_2 = \frac{2r_2}{d}$$

MOLAS DE TRAÇÃO

Enrolamento fechado (espiras em contato):

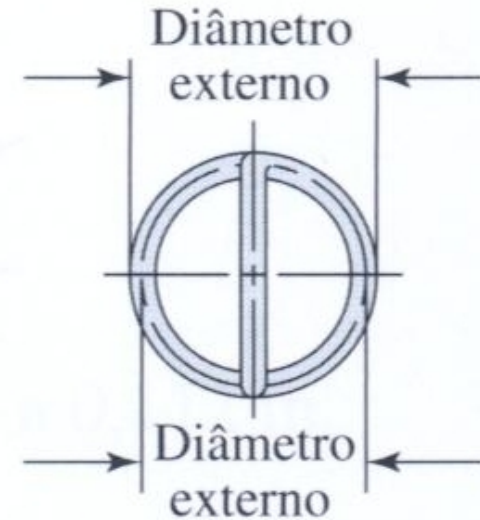
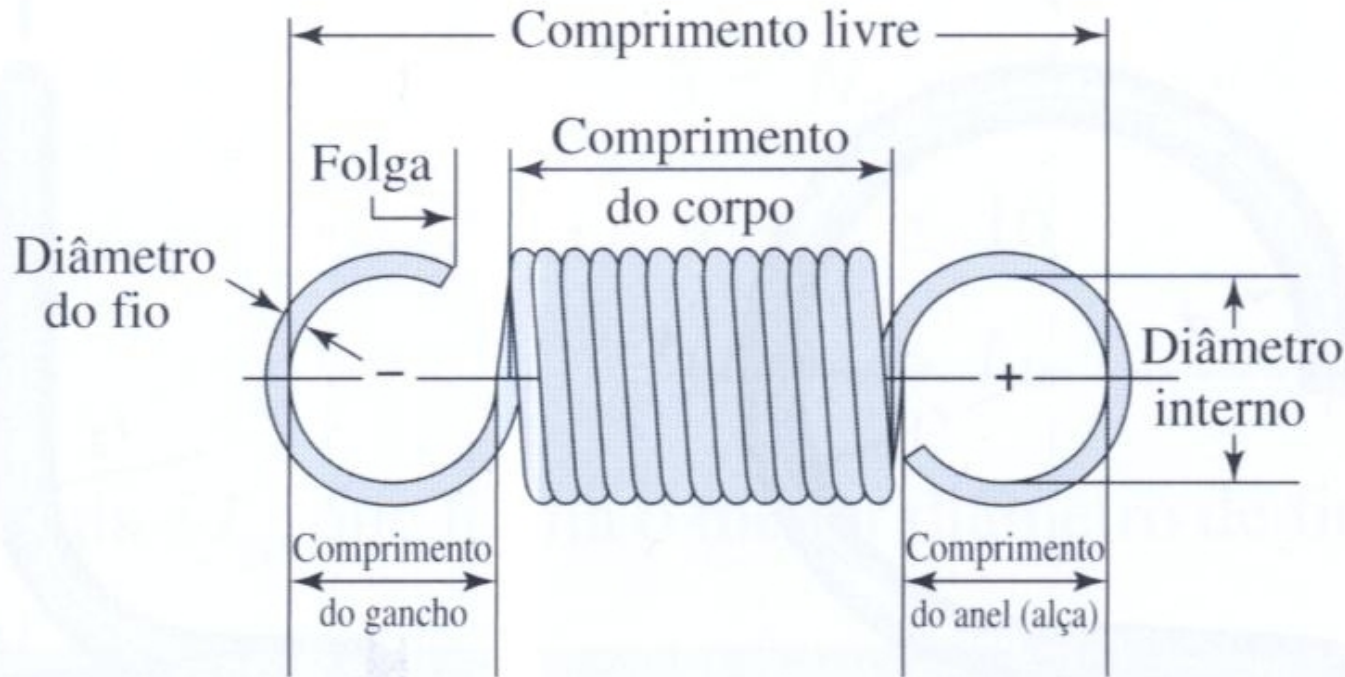


(a)

$$F = F_i + k \cdot y$$

Força de tração em função da deflexão y da mola.

MOLAS DE TRAÇÃO



Comprimento livre:

$$L_o = (2C - 1 + N_b) \cdot d$$

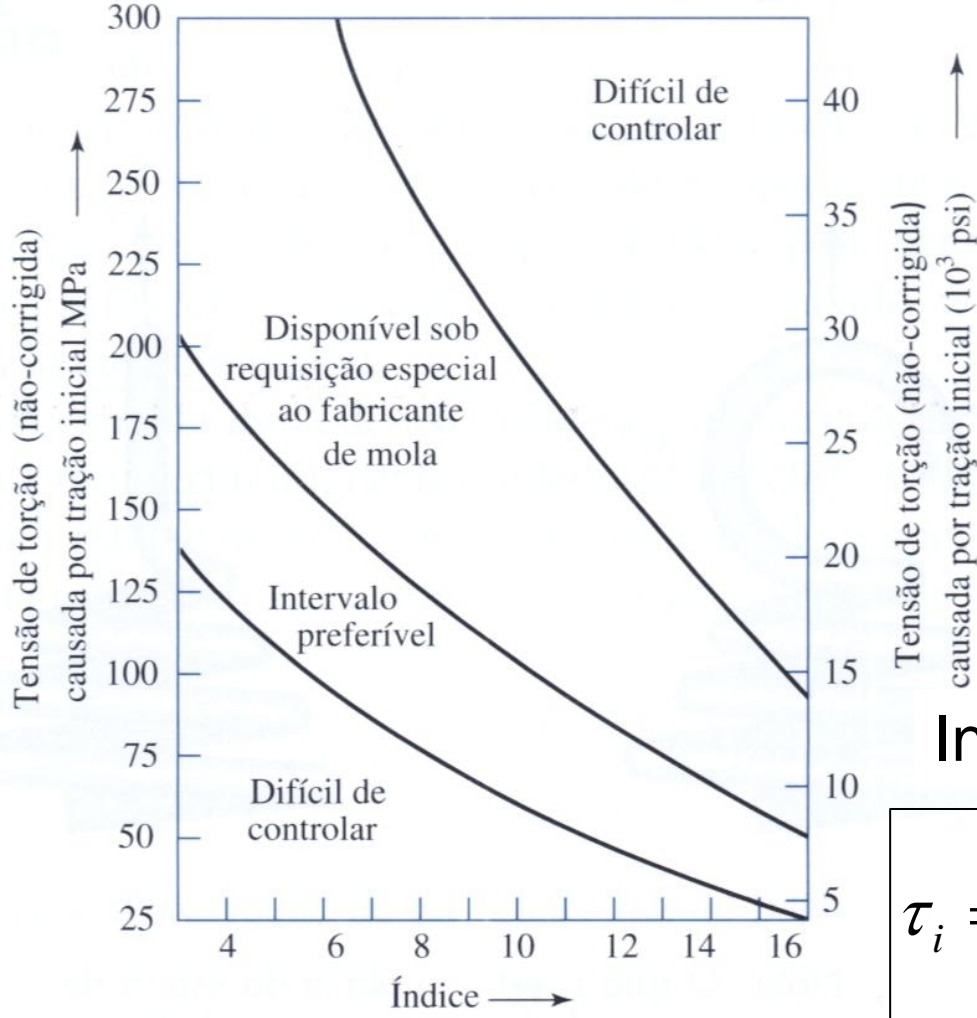
Constante da mola:

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a}$$

Número espiras ativas no corpo

$$N_a = N_b + \frac{G}{E}$$

MOLAS DE TRAÇÃO



Intervalo preferido:

$$\tau_i = \frac{33500}{e^{0,105.C}} \pm 1000 \left(4 - \frac{C-3}{6,5} \right) \text{ psi}$$

Figura 10-8c: Tensão de torção devida à tração inicial em função do índice da mola (C)

MOLAS DE TRAÇÃO

Tabela 10-7: Tensões máximas admissíveis (K_w ou K_s corrigido) para molas helicoidais de tração em aplicações estáticas.

Materials	Percentagem da Resistência de Tração		
	Corpo	Extremidade	Extremidade
Aços carbono patenteados, repuxados a frio ou endurecidos e revenidos, e aços de baixa liga	45-50	40	75
Aço austenítico inoxidável e ligas não-ferrosas	35	30	55

Esta informação está baseada nas seguintes condições: conjunto não removido e tratamento térmico de baixa temperatura aplicado. Para molas que requerem tração inicial elevada, use a mesma percentagem de resistência à tração que para a extremidade.

Fonte: *Design Handbook*, 1987, p. 52. Cortesia da Associated Spring.

MOLAS DE TRAÇÃO

EMPLO 10-6

Uma mola de extensão de fio duro repuxado tem um diâmetro de fio de 0,035 in, um diâmetro externo de espira de 0,248 in, raios de gancho $r_1 = 0,106$ in e $r_2 = 0,089$ in, e uma tração inicial de 1,19 lbf. O número de voltas de corpo é 12,17. A partir da informação dada:

- Determine os parâmetros físicos da mola.
- Verifique as condições iniciais de tensão de pré-carga.
- Encontre os fatores de segurança sob uma carga estática de 5,25 lbf.

(a) $D = OD - d = 0,248 - 0,035 = 0,213$ in

$$C = \frac{D}{d} = \frac{0,213}{0,035} = 6,086$$

$$K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} = 1,234$$

Equação (10-40): $N_a = N_b + G/E = 12,17 + 11,5/28,7 = 12,57$ voltas

Equação (10-9): $k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} = \frac{0,035^4 (11,5) 10^6}{8(0,213^3) 12,57} = 17,76$ lbf/in voltas

Equação (10-39): $L_0 = (2C - 1 + N_b)d = [2(6,086) - 1 + 12,17] 0,035 = 0,817$ in

A deflexão sob a carga de serviço é

$$y_{\max} = \frac{F_{\max} - F_i}{k} = \frac{5,25 - 1,19}{17,76} = 0,229$$
 in

em que o comprimento da mola torna-se $L = L_0 + y = 0,817 + 0,229 = 1,046$ in.

Tabela 10-5: Propriedades mecânicas de alguns fios de molas.

Material	Limite elástico, percentagem da S_{ur}		Diâmetro d , in	E		G	
	Tração	Torção		Mpsi	GPa	Mpsi	GPa
Fio musical A228	65-75	45-60	< 0,032	29,5	203,4	12,0	82,7
			0,033-0,063	29,0	200	11,85	81,7
			0,064-0,125	28,5	196,5	11,75	81,0
			> 0,125	28,0	193	11,6	80,0
Mola endurecida A227	60-70	45-55	< 0,032	28,8	198,6	11,7	80,7
			0,033-0,063	28,7	197,9	11,6	80,0
			0,064-0,125	28,6	197,2	11,5	79,3
			> 0,125	28,5	196,5	11,4	78,6
Revenido a óleo A239	85-90	45-50		28,5	196,5	11,2	77,2
Mola de válvula A230	85-90	50-60		29,5	203,4	11,2	77,2
Cromo-vanádio A231	88-93	65-75		29,5	203,4	11,2	77,2
			A232	29,5	203,4	11,2	77,2
Cromo-silício A401	85-93	65-75		29,5	203,4	11,2	77,2
Aço inoxidável							
A313*	65-75	45-55		28	193	10	69,0
17-7PH	75-80	55-60		29,5	208,4	11	75,8
414	65-70	42-55		29	200	11,2	77,2
420	65-75	45-55		29	200	11,2	77,2
431	72-76	50-55		30	206	11,5	79,3
Bronze-fósforo B159	75-80	45-50		15	103,4	6	41,4
Berílio-cobre B197	70	50		17	117,2	6,5	44,8
	75	50-55		19	131	7,3	50,3
Liga inconel X-750	65-70	40-45		31	213,7	11,2	77,2

* Também inclui 302, 304 e 316.

Nota: Ver Tabela 10-6 para valores de projeto de tensão admissível de torção.

MOLAS DE TRAÇÃO

(b) A tensão inicial não-corrigida é dada pela Equação (10-3) sem o fator de correção. Isto é

$$(\tau_i)_{\text{n\~{a}o-corrigida}} = \frac{8F_i D}{\pi d^3} = \frac{8(1,19)0,213(10^{-3})}{\pi(0,035^3)} = 15,1 \text{ kpsi}$$

O intervalo preferido é dado pela Equação (10-41) e, para este caso, é

$$\begin{aligned}(\tau_i)_{\text{pref}} &= \frac{33\,500}{\exp(0,105C)} \pm 1000 \left(4 - \frac{C-3}{6,5} \right) \\ &= \frac{33\,500}{\exp[0,105(6,086)]} \pm 1000 \left(4 - \frac{6,086-3}{6,5} \right) \\ &= 17\,681 \pm 3525 = 21,2, 14,2 \text{ kpsi}\end{aligned}$$

Assim, a tração inicial de 15,1 kpsi está dentro do intervalo preferido.

MOLAS DE TRAÇÃO

(c) Para fio duro repuxado, a Tabela 10-4 dá $m = 0,190$ e $A = 140 \text{ kpsi} \cdot \text{in}^m$. A partir da Equação (10-14),

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} = \frac{140}{0,035^{0,190}} = 264,7 \text{ kpsi}$$

Para cisalhamento por torção no corpo principal da mola, a partir da Tabela 10-7,

$$S_{sy} = 0,45S_{ut} = 0,45(264,7) = 119,1 \text{ kpsi}$$

A tensão de cisalhamento sob a carga de serviço é

$$\tau_{\max} = \frac{8K_B F_{\max} D}{\pi d^3} = \frac{8(1,234)5,25(0,213)}{\pi(0,035^3)} (10^{-3}) = 82,0 \text{ kpsi}$$

Logo, o fator de segurança é

$$n = \frac{S_{sy}}{\tau_{\max}} = \frac{119,1}{82,0} = 1,45$$

MATERIAIS E CONSTANTES

Tabela 10-4 Constantes A e m de $S_{ur} = A/d^m$ para estimativa da resistência mínima à tração de fios comuns de mola

Material	Número da ASTM	Expoente m	Diâmetro, in	A , kpsi · in ^m	Diâmetro, mm	A , MPa · mm ^m	Custo relativo do fio
Fio musical*	A228	0,145	0,004-0,256	201	0,10-6,5	2211	2,6
Fio OQ&T (temperado em banho de óleo e revenido)†	A229	0,187	0,020-0,500	147	0,5-12,7	1855	1,3
Fio repuxado duro‡	A227	0,190	0,028-0,500	140	0,7-12,7	1783	1,0
Fio de cromo-vanádio§	A232	0,168	0,032-0,437	169	0,8-11,1	2005	3,1
Fio de cromo-silício	A401	0,108	0,063-0,375	202	1,6-9,5	1974	4,0
Fio de aço inoxidável 302#	A313	0,146	0,013-0,10	169	0,3-2,5	1867	7,6-11
		0,263	0,10-0,20	128	2,5-5	2065	
		0,478	0,20-0,40	90	5,10	2911	
Fio de bronze-fósforo**	B159	0	0,004-0,022	145	0,1-0,6	1000	8,0
		0,028	0,022-0,075	121	0,6-2	913	
		0,064	0,075-0,30	110	2-7,5	932	

* Superfície suave, livre de defeitos e com acabamento brilhante e lustroso.

† Tem uma escama leve de termotratamento que deve ser removida antes de chapeamento (revestimento metálico).

‡ Superfície suave e brilhante sem marcas visíveis.

§ Fio revenido de qualidade aeronáutica, pode também ser obtido recozido.

|| Revenido para Rockwell C49, mas pode ser obtido sem revenido.

Aço inoxidável do tipo 302.

** Revenido CA510.

MOLAS DE TRAÇÃO

Para a flexão do gancho de extremidade em A

$$C_1 = 2r_1/d = 2(0,106)/0,035 = 6,057$$

Da Equação (10-35),

$$(K)_A = \frac{4C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} = \frac{4(6,057^2) - 6,057 - 1}{4(6,057)(6,057 - 1)} = 1,14$$

Da Equação (10-34),

$$\begin{aligned}\sigma_A &= F_{\max} \left[(K)_A \frac{16D}{\pi d^3} + \frac{4}{\pi d^2} \right] \\ &= 5,25 \left[1,14 \frac{16(0,213)}{\pi(0,035^3)} + \frac{4}{\pi(0,035^2)} \right] (10^{-3}) = 156,9 \text{ kpsi}\end{aligned}$$

A resistência ao escoamento, a partir da Tabela 10-7, é dada por

$$S_y = 0,75S_{ut} = 0,75(264,7) = 198,5 \text{ kpsi}$$

O fator de segurança para a flexão do gancho de extremidade em A é então

$$n_A = \frac{S_y}{\sigma_A} = \frac{198,5}{156,9} = 1,27$$

MOLAS DE TRAÇÃO

Para o gancho de extremidade em torção em B , a partir da Equação (10-37),

$$C_2 = 2r_2/d = 2(0,089)/0,035 = 5,086$$

$$(K)_B = \frac{4C_2 - 1}{4C_2 - 4} = \frac{4(5,086) - 1}{4(5,086) - 4} = 1,18$$

e a tensão correspondente, dada pela Equação (10-36), é

$$\tau_B = (K)_B \frac{8F_{\max}D}{\pi d^3} = 1,18 \frac{8(5,25)0,213}{\pi(0,035^3)} (10^{-3}) = 78,4 \text{ kpsi}$$

Usando a Tabela 10-7 para a resistência ao escoamento, o fator de segurança em B para torção do gancho de extremidade é

$$n_B = \frac{(S_{sy})_B}{\tau_B} = \frac{0,4(264,7)}{78,4} = 1,35$$

O escoamento devido à flexão do gancho de extremidade ocorrerá primeiro.

BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA



- **JUVINALL, Robert – Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas, LTC;**
- **HAMROCK, Bernard J. – Elementos de Máquinas – McGraw-Hill; e**
- **SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS – Projeto de Engenharia Mecânica, editora Bookman; e**
- **SHIGLEY, BUDYNAS-NISBETT – Mechanical Engineering Design, 8ª Ed. – Mc-Graw-Hill Primis.**