

ME355 - Elementos de Máquinas I

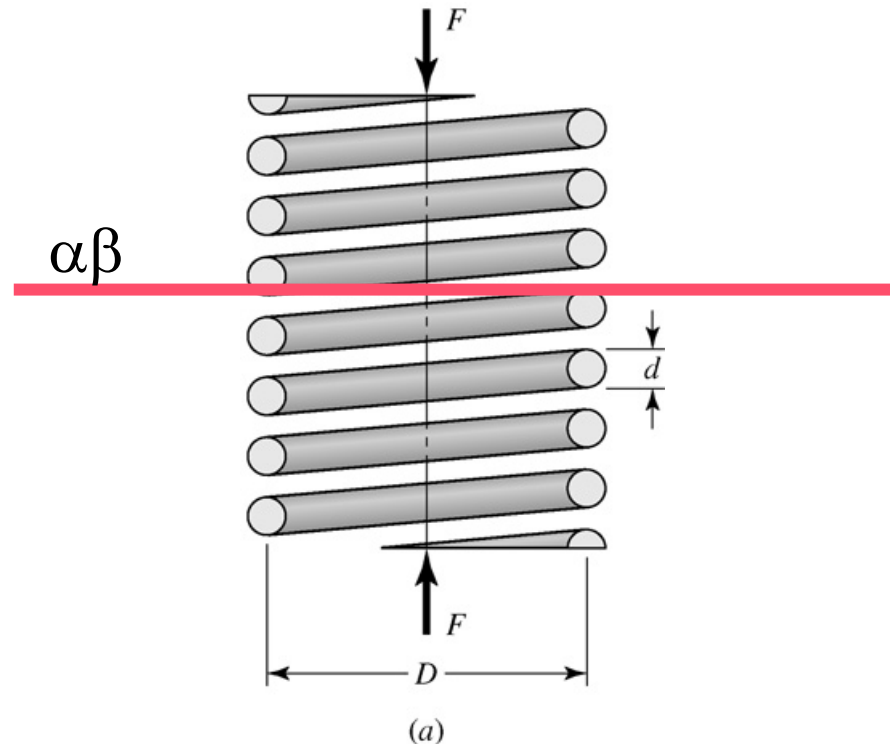
MOLAS DE COMPRESSÃO



Prof. Julio César de Almeida
Prof. Jorge Luiz Erthal

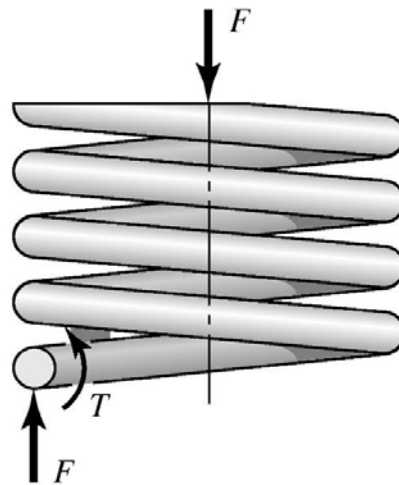
TENSÕES EM MOLAS HELICOIDAIS

- premissa: mola helicoidal de compressão, com arame circular, carregada pela força axial F .



TENSÕES EM MOLAS HELICOIDAIS

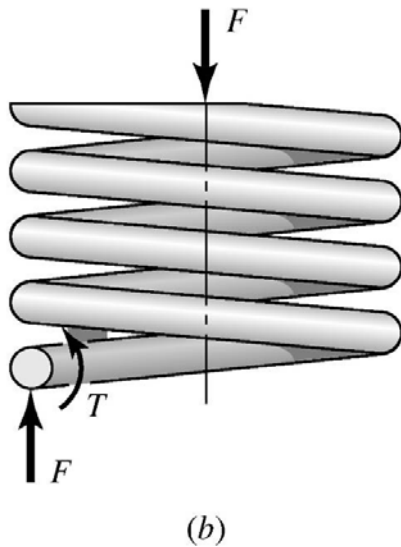
- supondo-se apenas a parte cortada pelo plano $\alpha\beta$ e incluindo-se os esforços internos resultantes:



(b)

TENSÕES EM MOLAS HELICOIDAIS

- pode-se determinar a tensão máxima na fibra interna do arame pela superposição dos efeitos de cisalhamento e de torção, resultando em:



$$\tau_{\max} = \frac{F}{A} + \frac{T \cdot r}{J_p}$$

$$\text{onde: } A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}; T = \frac{F \cdot D}{2}; r = \frac{d}{2}; J_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32}$$

TENSÕES EM MOLAS HELICOIDAIS

- logo:

$$\tau_{\max} = \frac{4F}{\pi \cdot d^2} + \frac{8F \cdot D}{\pi \cdot d^3}$$

introduzindo-se ainda o conceito do índice de curvatura da mola (C), obtém-se:

$$C = \frac{D}{d} \Rightarrow \tau_{\max} = K_s \cdot \frac{8F \cdot D}{\pi \cdot d^3}$$

TENSÕES EM MOLAS HELICOIDAIS

- onde o termo – K_s – corresponde ao fator de correção de cisalhamento e vale:

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C}$$

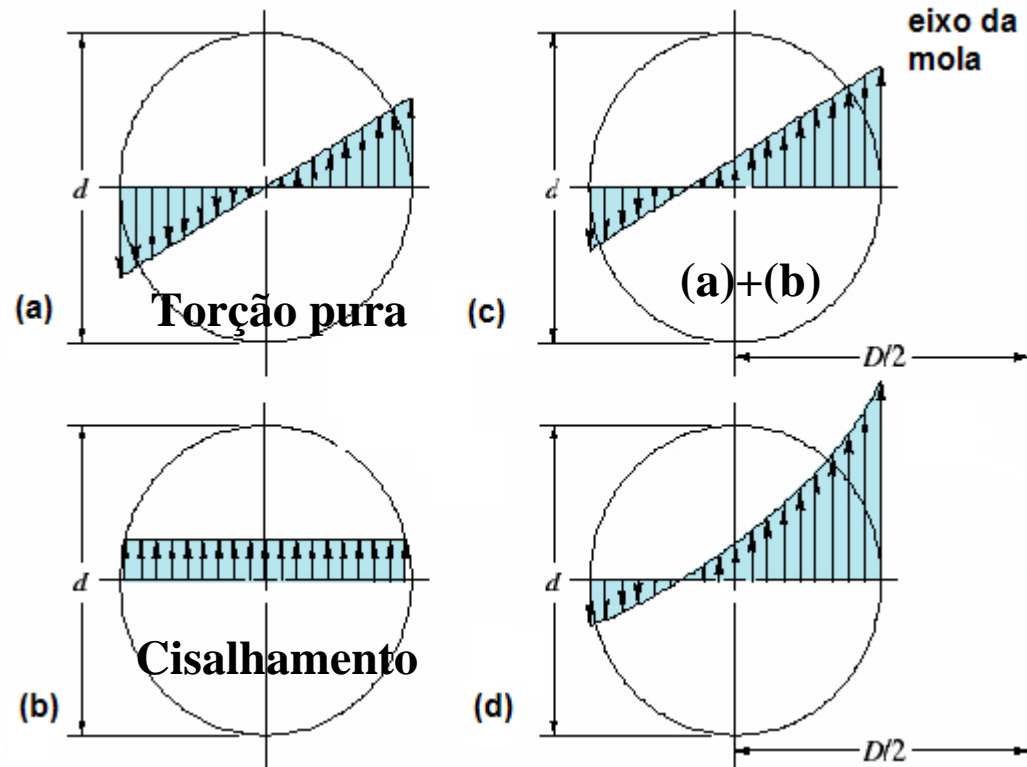
Notas:

- um bom projeto prevê um índice de curvatura entre 4 e 12;
- a equação envolvendo K_s deve ser utilizada apenas para carregamentos estáticos.

TENSOES EM MOLAS HELICOIDAIS

Efeito da curvatura e cargas dinâmicas

Além do cisalhamento direto, as superfícies internas da mola estão submetidas a um aumento de tensão torcional devido a própria curvatura da mola, conforme figura:



TENSOES EM MOLAS HELICOIDAIS

Efeito da curvatura e cargas dinâmicas

Wahl, foi um dos primeiros pesquisadores a estudar o efeito do cisalhamento transversal conjuntamente aos efeitos da curvatura da mola, propondo a utilização de um fator (fator de Wahl) em substituição ao fator de cisalhamento direto. Assim:

$$\tau_{\max} = K_w \cdot \frac{8F.D}{\pi.d^3}$$

$$K_w = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C}$$

TENSOES EM MOLAS HELICOIDAIS

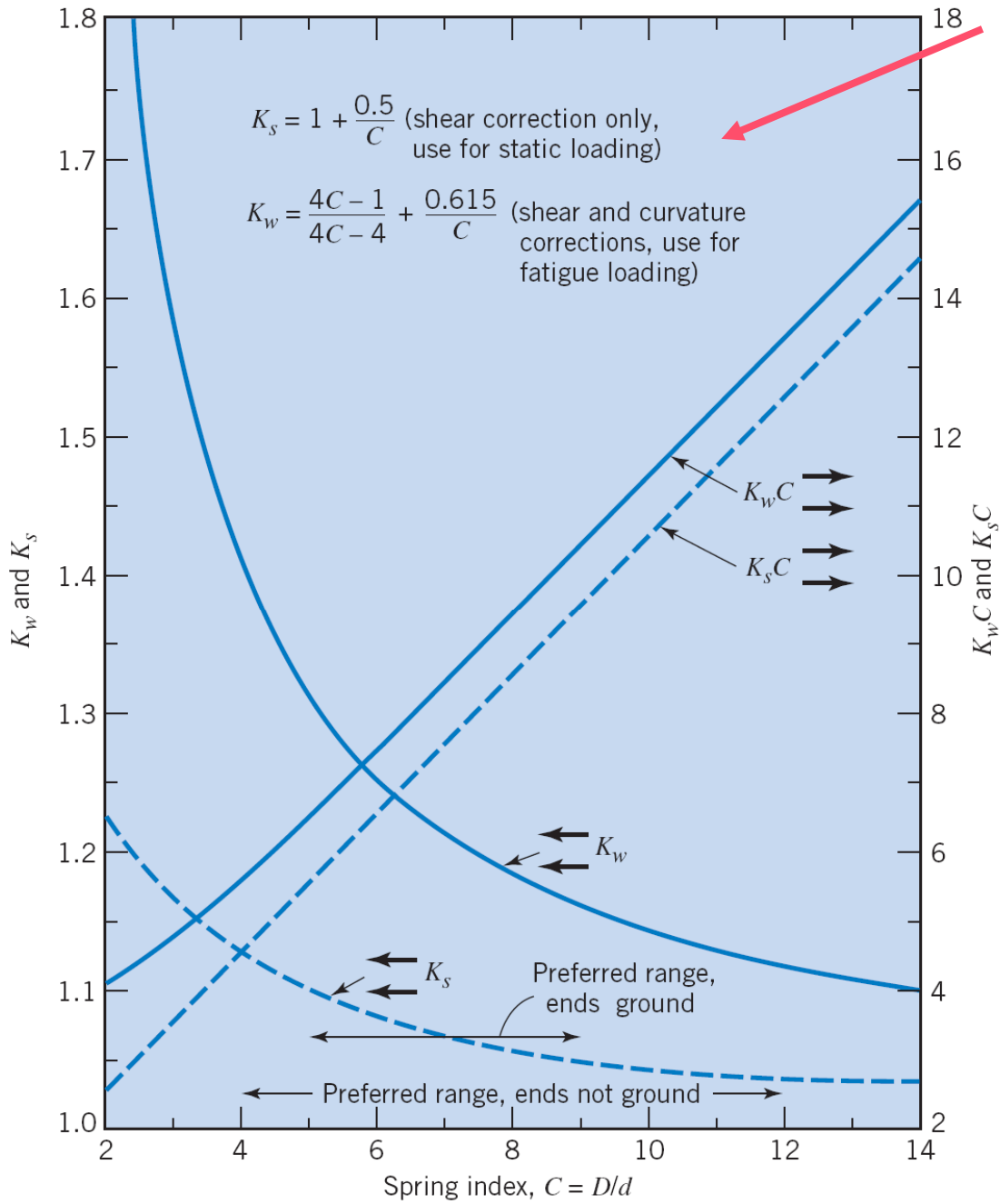
Efeito da curvatura e cargas dinâmicas

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C}$$

Notas:

- o primeiro termo corresponde a um “fator de concentração de tensões”;
- o segundo termo é equivalente ao fator de correção de cisalhamento – K_s ;
- para cargas dinâmicas propõem-se a utilização da equação geral corrigida pelo fator de Wahl.

K_w, K_s



DEFORMAÇÃO DE MOLAS HELICOIDAIS

A energia total de deformação de uma mola helicoidal vale:

$$U = \frac{T^2 \cdot L}{2 \cdot G \cdot J_p} + \frac{F^2 \cdot L}{2 \cdot G \cdot A}$$

onde: $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$; $T = \frac{F \cdot D}{2}$; $L = \pi \cdot D \cdot N$; $J_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32}$

$$U = \frac{4F^2 \cdot D^3 \cdot N}{G \cdot d^4} + \frac{2F^2 \cdot D \cdot N}{G \cdot d^2}$$

DEFORMAÇÃO DE MOLAS HELICOIDAIS

Pelo Teorema de Castigliano: $y = \frac{\partial U}{\partial F}$

$$y = \frac{8F.D^3.N}{G.d^4} + \frac{4.F.D.N}{G.d^2} \rightarrow C = \frac{D}{d}$$

$$y = \frac{8F.D^3.N}{G.d^4} \left(1 + \frac{1}{2C^2}\right)$$

$$y = \frac{8F.D^3.Na}{G.d^4}$$

Na - número de espiras ativas (coils);

D - diâmetro médio da mola;

d - diâmetro do arame;

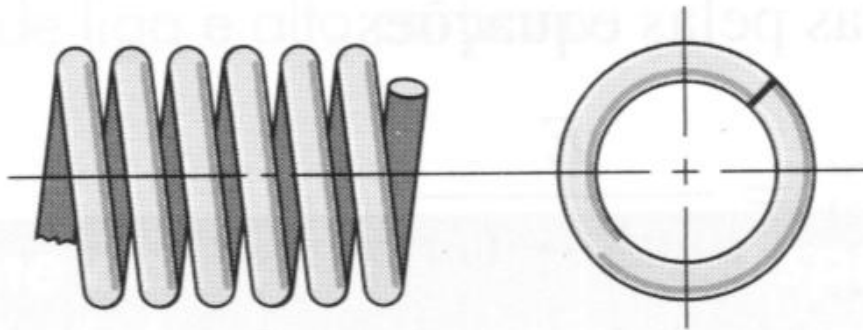
G - módulo de rigidez do material.

EXTREMIDADES DAS MOLAS HELICOIDAIS DE COMPRESSÃO

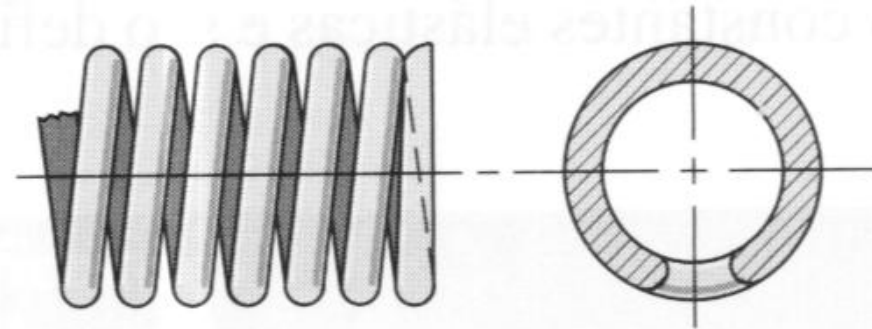
Fator de projeto bastante importante, visto que tal escolha afeta diretamente o número de espiras ativas e o comprimento da mola. Quatro são as possibilidades construtivas em termos de extremidades:

- retas (planas)
- retas (planas) e retificadas
- esquadrejadas
- esquadrejadas e retificadas

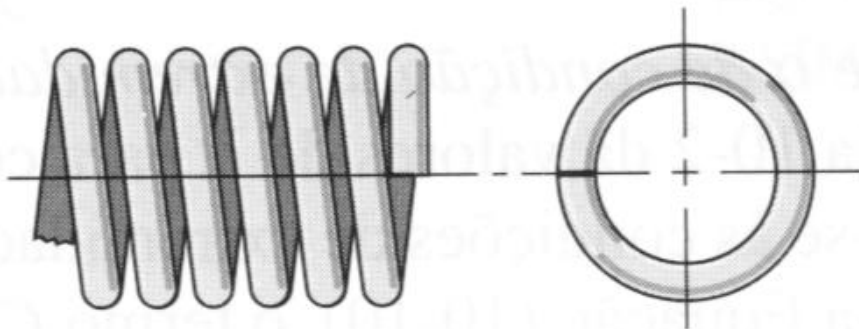
EXTREMIDADES DAS MOLAS HELICOIDAIS DE COMPRESSÃO



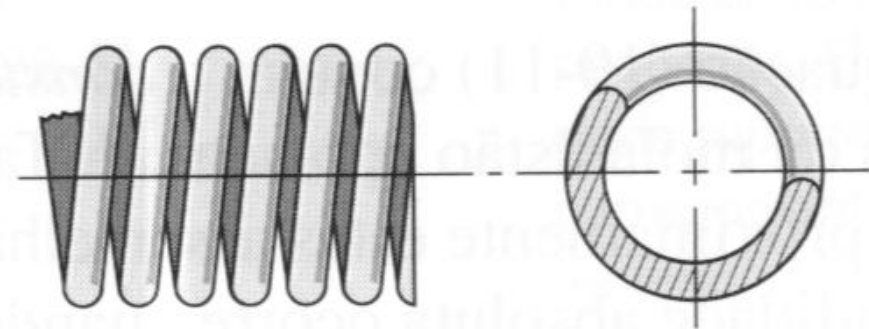
(a) Extremidade plana, direita



(c) Extremidade esquadrada
e esmerilhada, esquerda



(b) Extremidade esquadrada
ou fechada, direita



(d) Extremidade plana,
esmerilhada, esquerda

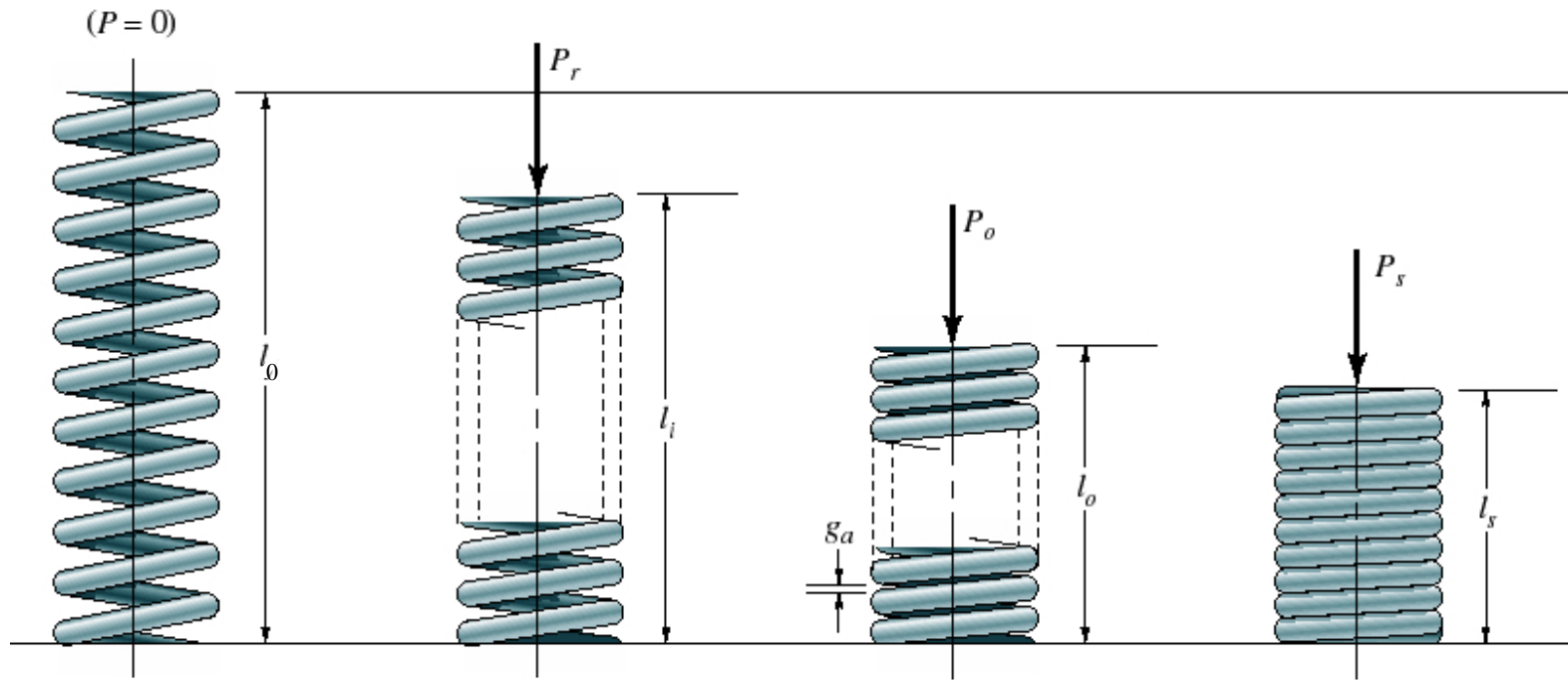
EXTREMIDADES DAS MOLAS HELICOIDAIS DE COMPRESSÃO

Tabela 10-1: Fórmulas para dimensões de molas de compressão
(N_a = número de espiras ativas)

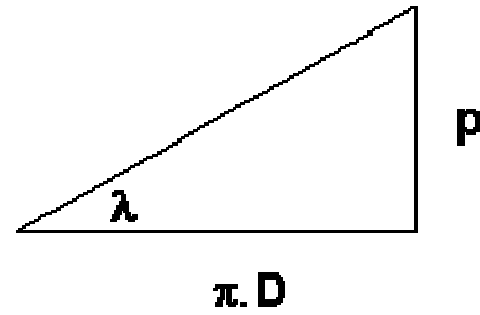
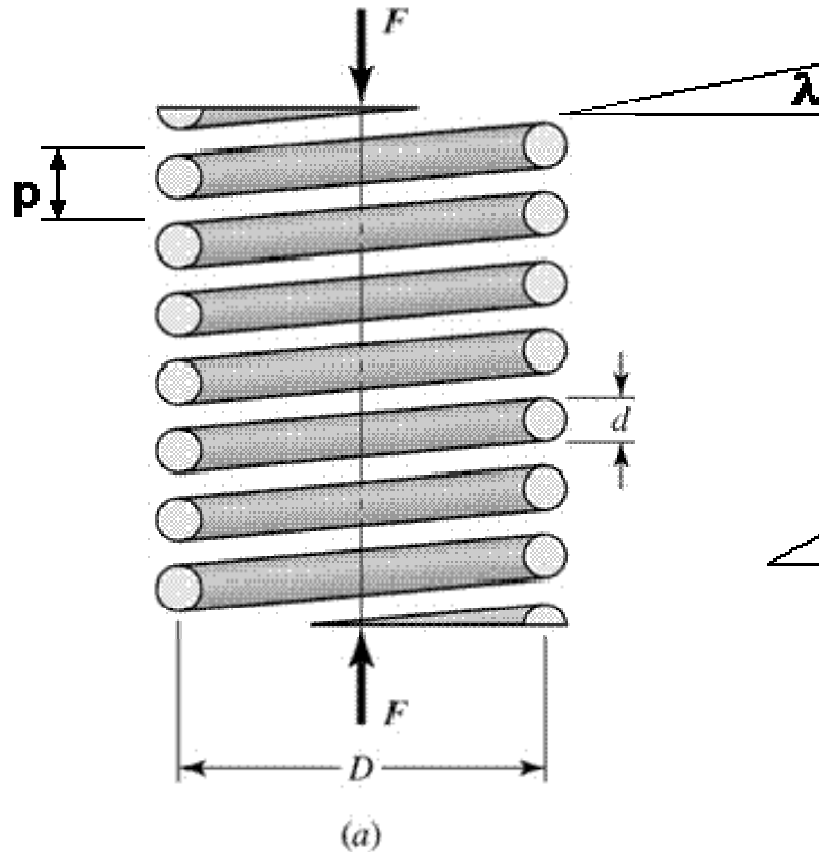
Termo	Tipos de Extremidades de Mola			
	Plana	Plana e esmerilhada	Esquadrada ou fechada	Esquadrada e esmerilhada
Espiras de extremidade, N_e	0	1	2	2
Espiras totais, N_t	N_a	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Comprimento livre, L_0	$pN_a + d$	$p(N_a + 1)$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Comprimento indeflectível (sólido), L_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Passo, p	$(L_0 - d)/N_a$	$L_0/(N_a + 1)$	$(L_0 - 3d)/N_a$	$(L_0 - 2d)/N_a$

$$N_t = N_a + N_e$$

COMPRIMENTOS LIVRE x SÓLIDO



PASSO x DIÂMETRO MÉDIO



$$\text{tg} \lambda = \frac{p}{\pi \cdot D}$$

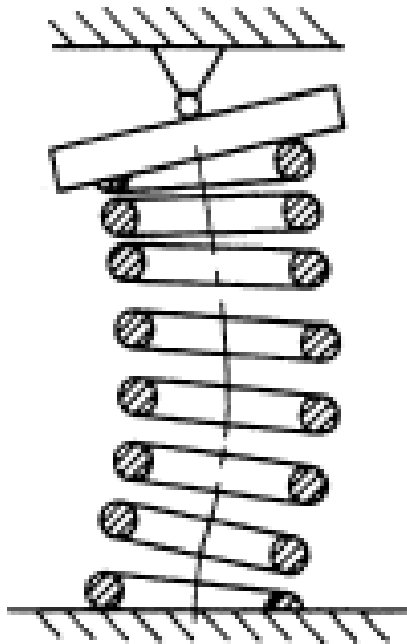
$\lambda = \text{ângulo de enrolamento} - \text{máx.} = 12^\circ$

DIÂMETROS PREFERENCIAIS DE ARAMES

0,10	0,12	0,16	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
0,55	0,60	0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,40
1,60	1,80	2,00	2,20	2,50	2,80	3,00	3,50	4,00	4,50
5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	8,00	9,00	10,0	11,0	12,0
13,0	14,0	15,0	16,0						

(mm)

ESTABILIDADE DE MOLAS DE COMPRESSÃO



Similarmente a uma coluna, molas de compressão podem vir a flambar para deflexões elevadas. A condição de estabilidade é obtida para:

$$L_0 \leq \frac{\pi \cdot D}{\alpha} \sqrt{\frac{2(E - G)}{2G + E}}$$

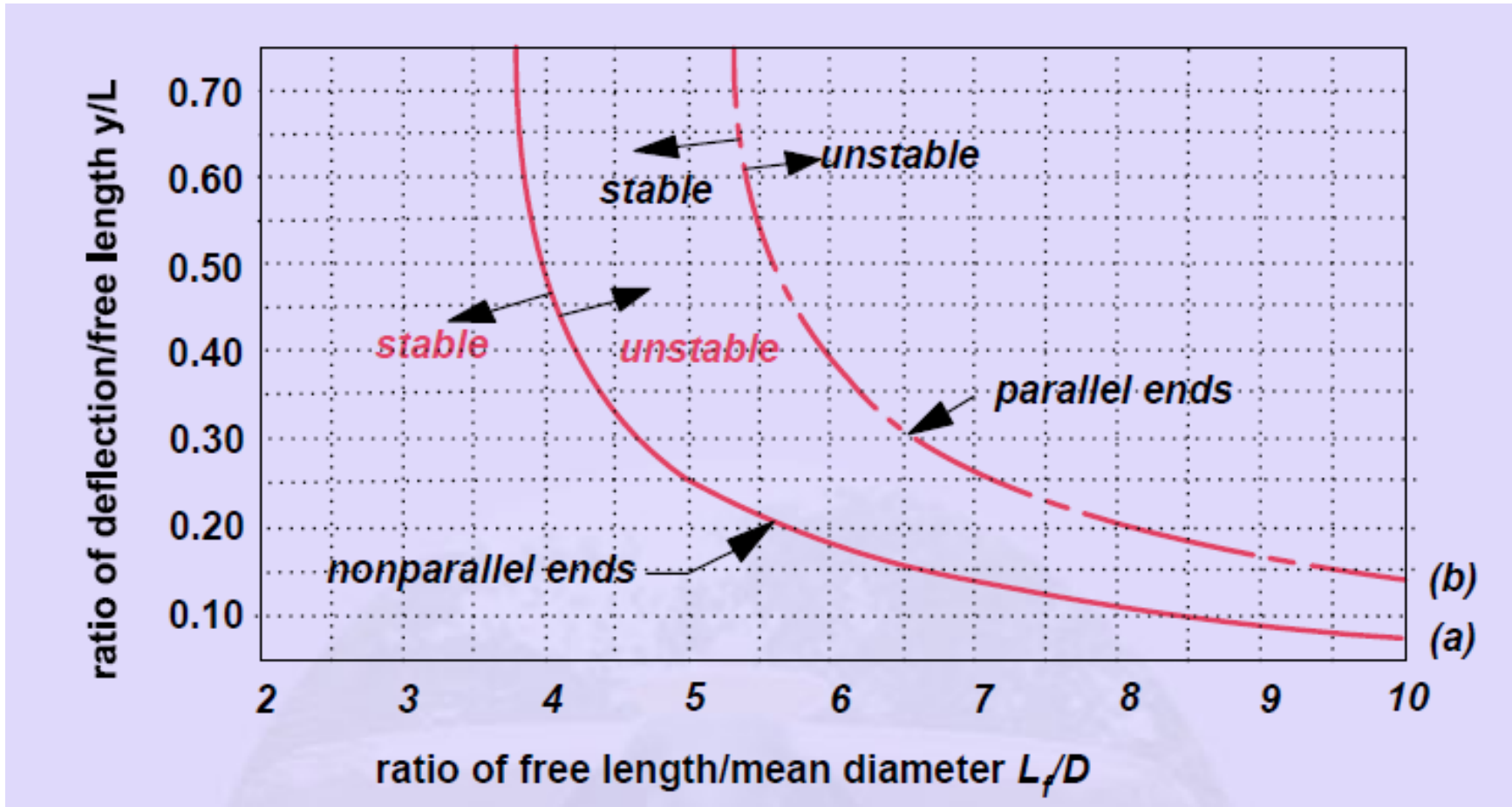
ESTABILIDADE DE MOLAS DE COMPRESSÃO

Tabela 10-2: Constantes de condição de extremidade α para molas helicoidais de compressão.

<i>Condição de extremidade</i>	<i>Constante α</i>
Mola suportada entre superfícies planas paralelas (extremidades fixas)	0,5
Uma extremidade suportada por superfície plana perpendicular ao eixo de mola (fixa); a outra extremidade pivotada (articulada)	0,707
Ambas as extremidades pivotadas (articuladas)	1
Uma extremidade engastada; a outra extremidade livre	2

* Extremidades apoiadas em superfícies planas devem ser esquadradas e esmerilhadas.

ESTABILIDADE DE MOLAS DE COMPRESSÃO



MATERIAIS E TENSÕES ADMISSÍVEIS

- as molas são manufaturadas por processos de trabalho a quente ou a frio, envolvendo aços comuns, aços liga, aços resistentes à corrosão e alguns materiais não ferrosos;
- as tensões atuantes numa mola variam com o tamanho do arame utilizado, resultando num gráfico - resistência x diâmetro do arame quase que linear (em escala log-log). A equação dessa reta vale:

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m}$$

MATERIAIS E CONSTANTES

Tabela 10-4 Constantes A e m de $S_{ut} = A/d^m$ 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.

MATERIAIS E TENSÕES ADMISSÍVEIS

- as tensões admissíveis de projeto são associadas a um percentual do limite de resistência da mola em análise. Tais percentuais dependem do tipo do material, bem como, da dimensão do arame selecionado e podem ser obtidos a partir de dados tabelados.

$$S_{RP} \leq \bar{\sigma} \text{ OU } S_{RP} \leq \bar{\tau}$$

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	88-93		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.

Tab. A28: Equivalentes decimais de bitola de fio e de chapa (polegada)



Nome da bitola:	Americana ou Brown & Sharpe	Birmingham ou Stubs Iron Wire Cano, tira ferrosa, fio achatado e aço de mola	Norma dos Estados Unidos† Chapa ferrosa e placa, 480 lbf/ft³	Norma dos fabricantes Chapa ferrosa	Fio de aço ou Washburn & Moen Fio ferroso, exceto fio de música	Fio de Música Fio de música	Fio de aço Stubs Vareta de broca de aço	Broca de sulcos espiralados Broca de sulcos espiralados e aço de broca
Uso principal:	Chapa não-ferrosa, fio ou bastão							
7/0	0,580 0		0,500		0,490			
6/0	0,580 0		0,468 75		0,461 5	0,004		
5/0	0,516 5		0,437 5		0,430 5	0,005		
4/0	0,460 0	0,454	0,406 25		0,393 8	0,006		
3/0	0,409 6	0,425	0,375		0,362 5	0,007		
2/0	0,364 8	0,380	0,343 75		0,331 0	0,008		
0	0,324 9	0,340	0,312 5		0,306 5	0,009		
1	0,289 3	0,300	0,281 25		0,283 0	0,010	0,227	0,228 0
2	0,257 6	0,284	0,265 625		0,262 5	0,011	0,219	0,221 0
3	0,229 4	0,259	0,25	0,239 1	0,243 7	0,012	0,212	0,213 0
4	0,204 3	0,238	0,234 375	0,224 2	0,225 3	0,013	0,207	0,209 0
5	0,181 9	0,220	0,218 75	0,209 2	0,207 0	0,014	0,204	0,205 5
6	0,162 0	0,203	0,203 125	0,194 3	0,192 0	0,016	0,201	0,204 0
7	0,144 3	0,180	0,187 5	0,179 3	0,177 0	0,018	0,199	0,201 0
8	0,128 5	0,165	0,171 875	0,164 4	0,162 0	0,020	0,197	0,199 0
9	0,114 4	0,148	0,156 25	0,149 5	0,148 3	0,022	0,194	0,196 0
10	0,101 9	0,134	0,140 625	0,134 5	0,135 0	0,024	0,191	0,193 5
11	0,090 74	0,120	0,125	0,119 6	0,120 5	0,026	0,188	0,191 0
12	0,080 81	0,109	0,109 357	0,104 6	0,105 5	0,029	0,185	0,189 0
13	0,071 96	0,095	0,093 75	0,089 7	0,091 5	0,031	0,182	0,185 0
14	0,064 08	0,083	0,078 125	0,074 7	0,080 0	0,033	0,180	0,182 0
15	0,057 07	0,072	0,070 312 5	0,067 3	0,072 0	0,035	0,178	0,180 0
16	0,050 82	0,065	0,062 5	0,059 8	0,062 5	0,037	0,175	0,177 0
17	0,045 26	0,058	0,056 25	0,053 8	0,054 0	0,039	0,172	0,173 0

* Especifique a chapa, o fio e a placa declarando o número de bitola, o nome da bitola e o equivalente decimal em parênteses.

† Reflete a média presente e os pesos de aço de chapa.

PROJETO DE MOLAS

Complementos de projeto

$$4 \leq C \leq 12$$



$C < 3$ – perigo trincas

$$3 \leq N_a \leq 15$$

$C > 12$ – emaranhamento fios

$$\xi \geq 0,15$$



deve-se evitar o encosto gradual das espiras
(imperfeições no passo da mola)

$$\xi = \frac{y_s}{y_1} - 1 = \frac{(L_o - L_s)}{y_1} - 1$$

$$CS \geq 1,2$$



para cargas estáticas

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K \cdot g}{W}}$$



para movimentos alternativos rápidos, deve-se
definir a frequência crítica da mola

onde: K = constante da mola

W = peso da mola

γ = peso específico da mola

$$W = \frac{\pi^2 \cdot d^2 \cdot D \cdot N_a \cdot \gamma}{4}$$

EXEMPLO 10-2

Uma mola helicoidal de compressão de fio musical é necessária para suportar uma carga de 20 lbf após ser comprimida em 2 in. Devido a considerações de montagem, a altura sólida não pode exceder a 1 in e o comprimento livre não pode ter mais que 4 in. Projete a mola.

As decisões *a priori* são:

- Fio musical, A228; da Tabela 10-4, $A = 201\,000 \text{ psi} \cdot \text{in}^m$; $m = 0,145$; da Tabela 10-5, $E = 28,5 \text{ Mpsi}$, $G = 11,75 \text{ Mpsi}$ (esperando que $d > 0,064 \text{ in}$)
- Extremidades esquadradas e esmerilhadas
- Função: $F_{\max} = 20 \text{ lbf}$, $y_{\max} = 2 \text{ in}$
- Segurança: use fator de projeto na altura sólida de $(n_s)_d = 1,2$
- Linearidade robusta: $\xi = 0,15$
- Use mola tipo enrolada (mais barata), $S_{sy} = 0,45S_{ut}$ pela Tabela 10-6
- Variável de decisão: $d = 0,080 \text{ in}$, bitola de fio musical nº 30, Tabela A-25. Usando a Figura 10-3 e a Tabela 10-6,

$$S_{sy} = 0,45 \frac{201\,000}{0,080^{0,145}} = 130\,455 \text{ psi}$$

EXEMPLO 10-2 (cont.)



A partir da Figura 10-3 ou da Equação (10-23),

$$\alpha = \frac{S_{sy}}{n_s} = \frac{130\,455}{1,2} = 108\,713 \text{ psi}$$

$$\beta = \frac{8(1 + \xi)F_{\max}}{\pi d^2} = \frac{8(1 + 0,15)20}{\pi(0,080^2)} = 9151,4 \text{ psi}$$

$$C = \frac{2(108\,713) - 9151,4}{4(9151,4)} + \sqrt{\left[\frac{2(108\,713) - 9151,4}{4(9151,4)} \right]^2 - \frac{3(108\,713)}{4(9151,4)}} = 10,53$$

Continuando com a Figura 10-3:

$$D = Cd = 10,53(0,080) = 0,8424$$

$$K_B = \frac{4(10,53) + 2}{4(10,53) - 3} = 1,128$$

$$\tau_s = 1,128 \frac{8(1 + 0,15)20(0,8424)}{\pi(0,080)^3} = 108\,700 \text{ psi}$$

$$n_s = \frac{130\,445}{108\,700} = 1,2$$

EXEMPLO 10-2 (cont.)

$$OD = 0,843 + 0,080 = 0,923 \text{ in}$$

$$N_a = \frac{0,080^4 (11,75) 10^6 (2)}{8(0,843)^3 20} = 10,05 \text{ voltas}$$

$$N_t = 10,05 + 2 = 12,05 \text{ total voltas}$$

$$L_s = 0,080(12,05) = 0,964 \text{ in}$$

$$L_0 = 0,964 + (1 + 0,15)2 = 3,264 \text{ in}$$

$$(L)_{cr} = 2,63(0,843/0,5) = 4,43 \text{ in}$$

$$fom = -2,6\pi^2(0,080)^2 12,05(0,843)/4 = -0,417$$

Repita o procedimento acima para outros diâmetros de fio e forme uma tabela (facilmente realizável com um programa de planilha de cálculo):

EXEMPLO 10-2 (cont.)

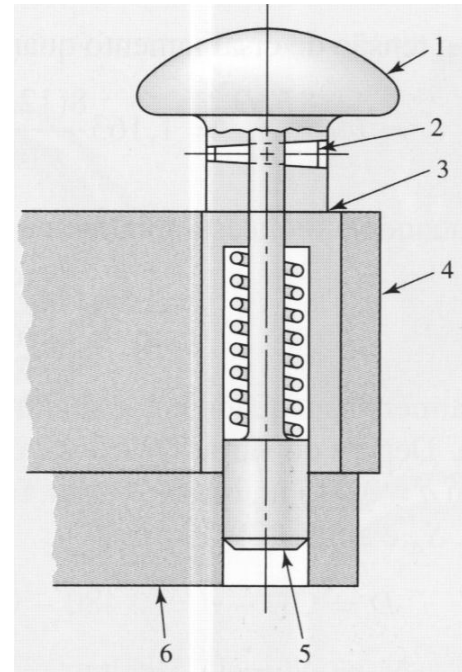


d:	0,063	0,067	0,071	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095
D	0,391	0,479	0,578	0,688	0,843	1,017	1,211	1,427
C	6,205	7,153	8,143	9,178	10,53	11,96	13,46	15,02
OD	0,454	0,546	0,649	0,763	0,923	1,102	1,301	1,522
N_a	39,1	26,9	19,3	14,2	10,1	7,3	5,4	4,1
L_s	2,587	1,936	1,513	1,219	0,964	0,790	0,668	0,581
L_0	4,887	4,236	3,813	3,519	3,264	3,090	2,968	2,881
$(L_0)_{cr}$	2,06	2,52	3,04	3,62	4,43	5,35	6,37	7,51
n_s	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
fom	-0,409	-0,399	-0,398	-0,404	-0,417	-0,438	-0,467	-0,505

Agora examine a tabela e faça a avaliação de adequação. A restrição $3 \leq N_a \leq 15$ exclui diâmetros de fios menores que 0,080 in. A restrição do índice de mola $4 \leq C \leq 12$ exclui diâmetros maiores que 0,085 in. A restrição $L_s > 1$ exclui diâmetros menores que 0,080 in. A restrição $L_0 > 4$ exclui diâmetros menores que 0,071 in. O critério de flambagem exclui comprimentos livres maiores que $(L_0)_{cr}$, o que exclui diâmetros menores que 0,075 in. O fator de segurança n_s é exatamente 1,20 porque a matemática o obriga a isso. Tivesse a mola estado em um orifício ou sobre uma barra, o diâmetro de hélice seria escolhido sem referência a $(n_s)_d$. O resultado é que existem apenas duas molas no domínio exequível, uma com um diâmetro de fio de 0,080 in e a outra com um diâmetro de fio de 0,085. A figura de mérito decide e a decisão é com diâmetro de fio de 0,080 in.

EXEMPLO 10-3

Indexação é usada em operações de máquina quando uma peça circular sendo manufaturada deve ser dividida em um certo número de segmentos. A Figura 10-4 mostra parte de um acessório de indexação usado para posicionar sucessivamente uma peça para a operação. Quando a maçaneta é girada, a parte 6, que segura a peça, é rodada em relação a um eixo vertical até a próxima posição, e é travada aí, soltando o pino de índice. Neste exemplo, desejamos projetar a mola para exercer uma força de aproximadamente 3 lbf e caber no espaço definido na legenda da figura.



Parte 1, maçaneta de girar; parte 2, pino cônico de retenção; parte 3, bucha endurecida com ajuste de pressão; parte 4, corpo do acessório; parte 5, pino de indexação; parte 6, suporte da peça. O espaço da mola tem $\frac{5}{8}$ in de diâmetro externo (OD), $\frac{1}{4}$ in de diâmetro interno (ID) e $1\frac{3}{8}$ in de comprimento com o pino abaixado, como mostrado. A maçaneta deve ser girada $\frac{3}{4}$ in para permitir indexação.

EXEMPLO 10-3 (cont.)

Visto que o acessório não é um item de alta produção, uma mola de estoque será selecionada. Estas estão disponíveis em fio musical. Em um catálogo existem 76 molas de estoque disponíveis tendo um diâmetro externo de 0,480 in e projetadas para trabalhar em um orifício de $\frac{1}{2}$ in. Estas são feitas em sete tamanhos de fio diferentes, variando de 0,038 a 0,063 in, e em comprimentos livres de $\frac{1}{2}$ a $2\frac{1}{2}$ in, dependendo do tamanho do fio.

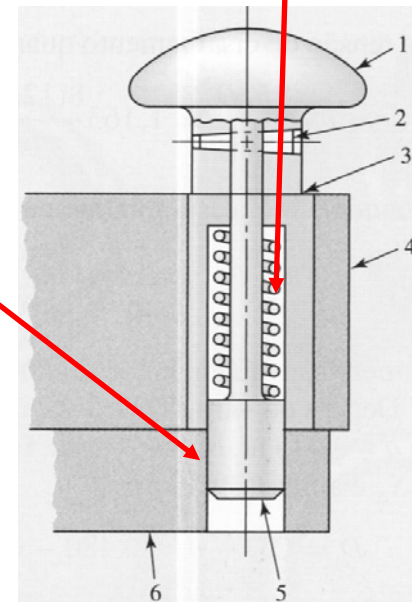
Visto que a maçaneta deve ser girada $\frac{3}{4}$ in para indexação e que o espaço para a mola é de $1\frac{3}{8}$ in de comprimento quando o pino estiver baixado, o comprimento sólido não pode ter mais que $\frac{5}{8}$ in.

Vamos começar selecionando uma mola que tenha um diâmetro externo de 0,480 in, um tamanho de fio de 0,051 in, um comprimento livre de $1\frac{3}{4}$ in, $11\frac{1}{2}$ voltas completas e extremidades planas. Então, $m = 0,145$ e $A = 201 \text{ kpsi} \cdot \text{in}^m$ para fio musical. Então

$$S_{sy} = 0,45 \frac{A}{d^m} = 0,45 \frac{201}{0,051^{0,145}} = 139,3 \text{ kpsi}$$

Tabela 10-4 Constantes A e m de $S_{yt} = A/d^m$ 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	A229	0,187	0,020-0,500	147	0,5-12,7	1855	1,3



EXEMPLO 10-3 (cont.)

Com extremidades planas, a partir da Tabela 10-1, o número de voltas ativas é

$$N_a = N_t = 11,5 \text{ voltas}$$

Termo	Tipos de Extremidades de Mola			
	Plana	Plana e esmerilhada	Esquadrada ou fechada	Esquadrada e esmerilhada
Espiras de extremidade, N_e	0	1	2	2
Espiras totais, N_t	N_a	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Comprimento livre, L_0	$pN_a + d$	$p(N_a + 1)$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Comprimento indeflectível (sólido), L_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Passo, p	$(L_0 - d)/N_a$	$L_0/(N_a + 1)$	$(L_0 - 3d)/N_a$	$(L_0 - 2d)/N_a$

EXEMPLO 10-3 (cont.)

O diâmetro médio de hélice é $D = OD - d = 0,480 - 0,051 = 0,429$ in. A partir da Equação (10-9), a razão de mola é, para $G = 11,85(10^6)$ psi da Tabela 10-5,

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} = \frac{0,051^4 (11,85) 10^6}{8(0,429)^3 11,5} = 11,0 \text{ lbf/in}$$

Material	Limite elástico, percentagem da S_{ut}		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

EXEMPLO 10-3 (cont.)

A partir da Tabela 10-1, a altura sólida L_s é

$$L_s = d(N_t + 1) = 0,051(11,5 + 1) = 0,638 \text{ in}$$

Termo	Tipos de Extremidades de Mola			
	Plana	Plana e esmerilhada	Esquadrada ou fechada	Esquadrada e esmerilhada
Espiras de extremidade, N_e	0	1	2	2
Espiras totais, N_t	N_o	$N_o + 1$	$N_o + 2$	$N_o + 2$
Comprimento livre, L_0	$pN_o + d$	$p(N_o + 1)$	$pN_o + 3d$	$pN_o + 2d$
Comprimento indeflectível (sólido), L_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Passo, p	$(L_0 - d)/N_o$	$L_0/(N_o + 1)$	$(L_0 - 3d)/N_o$	$(L_0 - 2d)/N_o$

EXEMPLO 10-3 (cont.)

A força de mola quando o pino está abaixado, F_{min} , é

$$F_{min} = ky_{min} = 11,0(1,75 - 1,375) = 4,13 \text{ lbf}$$

Quando a mola está totalmente comprimida, a força de mola F_s é

$$F_s = ky_s = k(L_0 - L_s) = 11,0(1,75 - 0,638) = 12,2 \text{ lbf}$$

Visto que o índice de mola é $C = D/d = 0,429/0,051 = 8,41$,

$$K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} = \frac{4(8,41) + 2}{4(8,41) - 3} = 1,163$$

e para mola tipo enrolada, a tensão de cisalhamento quando totalmente comprimida é

$$\tau_s = K_B \frac{8F_s D}{\pi d^3} = 1,163 \frac{8(12,2)0,429}{\pi(0,051)^3} = 116\,850 \text{ psi}$$

O fator de segurança quando a mola está totalmente comprimida é

$$n_s = \frac{S_{sy}}{\tau_s} = \frac{139,3}{116,9} = 1,19$$

EXEMPLO 10-3 (cont.)



Visto que n_s é marginalmente adequado e L_s é maior que $\frac{5}{8}$ in, devemos investigar outras molas com um tamanho menor de fio. Depois de várias investigações, uma outra mola tem possibilidades. É o tipo musical enrolado, com $d = 0,045$ in, bitola 20 (ver Tabela A-25), diâmetro externo OD = 0,480 in, $N_a = 11,5$ voltas, $L_0 = 1,75$ in. S_{sy} é ainda 139,3 kpsi, e

$$D = OD - d = 0,480 - 0,045 = 0,435 \text{ in}$$

$$N_a = N_t = 11,5 \text{ voltas}$$

$$k = \frac{0,045^4 (11,85) 10^6}{8(0,435)^3 11,5} = 6,42 \text{ lbf/in}$$

$$L_s = d(N_a + 1) = 0,045(11,5 + 1) = 0,563 \text{ in}$$

$$F_{\min} = k y_{\min} = 6,42(1,75 - 1,375) = 2,41 \text{ lbf}$$

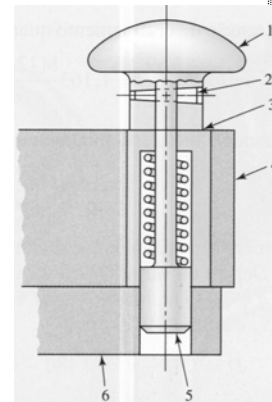
$$F_s = 6,42(1,75 - 0,563) = 7,62 \text{ lbf}$$

$$C = \frac{D}{d} = \frac{0,435}{0,045} = 9,67$$

$$K_B = \frac{4(9,67) + 2}{4(9,67) - 3} = 1,140$$

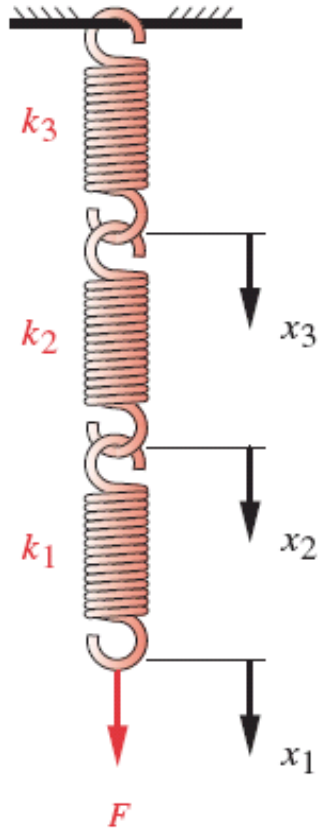
$$\tau_s = 1,140 \frac{8(7,62)0,435}{\pi(0,045)^3} = 105\,600 \text{ psi}$$

$$n_s = \frac{S_{sy}}{\tau_s} = \frac{139,3}{105,6} = 1,32$$



Agora $n_s > 1,2$; flambagem não é possível, visto que as espiras estão protegidas pela superfície do orifício, e o comprimento sólido é menor que $\frac{5}{8}$ in; assim, esta mola é selecionada. Usando uma mola de estoque, tiramos proveito da economia de escala

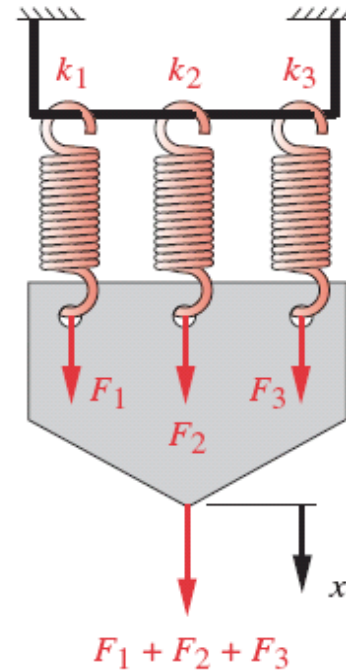
ASSOCIAÇÃO DE MOLAS



$$\delta = \delta_1 + \delta_2$$

$$F = F_1 = F_2 = F_3$$

SÉRIE



$$\delta = \delta_1 = \delta_2 = \delta_3$$

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

PARALELO

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.**