

Molas mecânicas

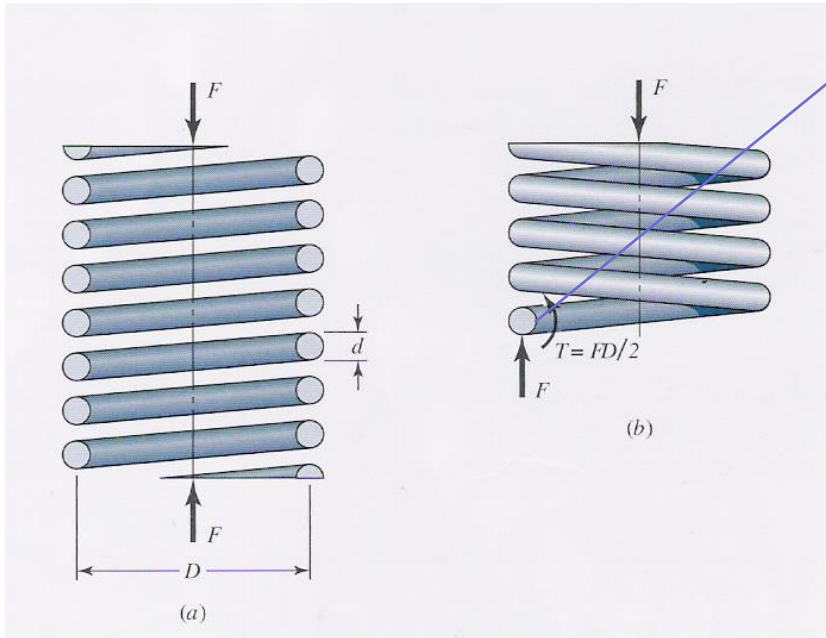


<https://www.youtube.com/watch?v=jAawhg6JtyY>

<https://www.youtube.com/watch?v=99KNCCliMQI>



1. Tensões em Molas Helicoidais de Compressão



$$\tau_{\max} = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A}$$

$\begin{matrix} \nearrow & \nearrow \\ FD/2, & d/2, \\ \searrow & \searrow \\ \pi d^4/32 & \frac{\pi d^2}{4} \end{matrix}$

Índice de mola $C = \frac{D}{d} \quad 4 \leq C \leq 12$

Fator de Bergsträsser $K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3}$
 Efeito da cortante e da curvatura

$$\tau = K_B \frac{8FD}{\pi d^3}$$

Não há fator de concentração de tensão

2. Deformações em Molas Helicoidais de Compressão

$$U = \frac{T^2 l}{2GJ} + \frac{F^2 l}{2AG} \quad \text{Teoria da Energia de Deformação}$$

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

$$y = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{8FD^3 N}{d^4 G} + \frac{4FDN}{d^2 G} \quad \text{Teorema de Castigliano}$$

$$y = \frac{8FD^3 N}{d^4 G} \left(1 + \frac{1}{2C^2} \right) \approx \frac{8FD^3 N}{d^4 G} \quad \text{Erro menor que 3\%}$$

$$k = F/y$$

$$k \approx \frac{d^4 G}{8D^3 N}$$

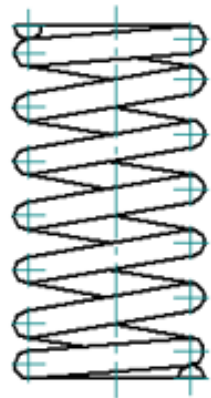
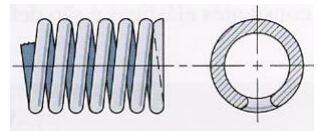
Ver item 10.3 do Shigley

3. Número de Espiras Ativas

Número de Espiras Ativas

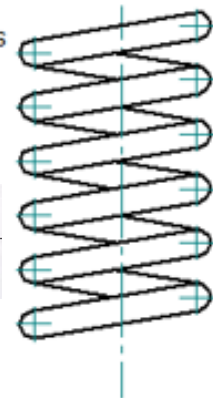
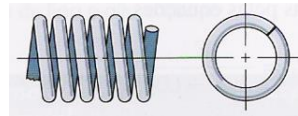
Extremidades esquadrejaas e esmerilhadas

$$n_t = n_a + 2$$



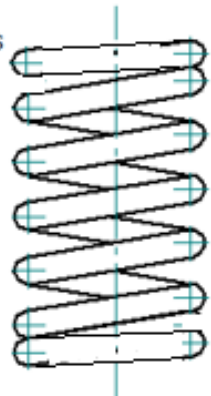
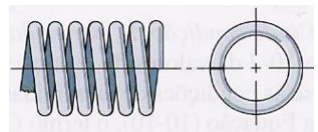
Extremidade simples

$$n_t = n_a$$



Extremidades esquadrejadas

$$n_t = n_a + 2$$



Extremidades simples e esmerilhadas

$$n_t = n_a + 1$$

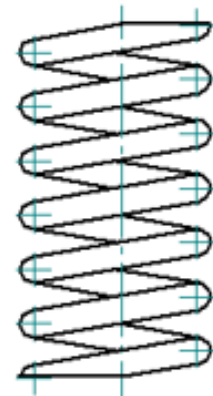
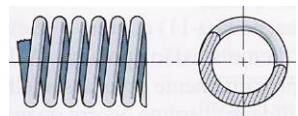


Tabela 10-1 Fórmulas para dimensões de mola de compressão (N_a = número de espiras ativas)

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	$(L_0 - d)/N_a$	$L_0/(N_a + 1)$	$(L_0 - 3d)/N_a$	$(L_0 - 2d)/N_a$

Fonte: *Design Handbook*, 1987, p. 32. Cortesia da Associated Spring.

COMPRIMENTO SÓLIDO PARA MOLAS ESQUADREJADAS E ESMERILHADAS (MÉDIA)

$$L_s = (N_t - a)d \quad a = 0,75 \text{ (VALOR MÉDIO)}$$

4. Estabilidade lateral (equivalente à flambagem)

$$L_0 < 2,63 \frac{D}{\alpha}$$

Para extremidades esquadrejadas, esmerilhadas e guiadas:

$$\alpha = 0,5 \text{ e } L_0 \leq 5,26D$$

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

Condição de extremidade	Constante α
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.

5. Materiais da Mola

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

$$0,35S_{ut} \leq S_{sy} \leq 0,52S_{ut}$$

Valores gerais para aços
Para valores específicos, ver
tabela a seguir

<i>Porcentagem máxima de resistência de tração</i>		
Material	Antes da remoção de assentamento (inclui K_w ou K_B)	Após a remoção de assentamento (inclui K_s)
Fio musical e aço carbono estirado a frio	45	60–70
Aço carbono endurecido e revenido e aço de baixa liga	50	65–75
Aços austeníticos inoxidáveis	35	55–65
Ligas não ferrosas	35	55–65

Tabela 10-3 Aços de mola de liga e alto carbono

Nome do material	Especificações similares	Descrição
Fio musical 0,80-0,95C	UNS G10850 AISI 1085 ASTM A228-51	Este é o melhor, o mais tenaz e o mais amplamente usado entre todos os materiais de mola para molas pequenas. Ele tem a maior resistência à tração e pode suportar tensões mais elevadas sob carregamento repetido que qualquer outro material de mola. Disponível em diâmetros 0,12 a 3 mm (0,005 a 0,125 in). Não deve ser usado acima de 120°C (250°F) ou a temperaturas abaixo de zero.
Fio revenido em óleo 0,60-0,70C	UNS G10650 AISI 1065 ASTM 229-41	Este aço de mola de propósito geral é usado para muitos tipos de molas de espira nos quais o custo do fio musical é proibitivo e em tamanhos maiores que os disponíveis em fio musical. Não recomendado para carregamento de choque e impacto. Disponível em diâmetros de 3 a 12 mm (0,125 a 0,5000 in), mas tamanhos maiores e menores podem ser obtidos. Não recomendado para uso acima de 180°C (350°F) ou em temperaturas abaixo de zero.
Fio repuxado duro 0,60-0,70C	UNS G10660 AISI 1065 ASTM A227-47	Este é o aço de mola mais barato de propósito geral e deve ser usado somente quando vida, acurácia e deflexão não são muito importantes. Disponível em diâmetros de 0,8 a 12 mm (0,031 a 0,500 in). Não recomendado para uso acima de 120°C (250°F) ou a temperaturas abaixo de zero.
Cromo-vanádio	UNS G61500 AISI 6150 ASTM 231-41	Este é o aço liga de mola mais popular para condições envolvendo tensões mais elevadas que pode ser usado com aços de alto-carbono e nas quais resistência à fadiga e resistência longa são necessárias. Também bom para cargas de choque e impacto. Amplamente usado para molas de válvulas de motor de aeronaves e para temperaturas até 220°C (425°F). Disponível em tamanhos recozidos ou pré-revenidos de 0,8 a 12 mm (0,031 a 0,500 in) de diâmetro.
Cromo-silício	UNS G92540 AISI 9254	Esta liga é um material excelente para molas altamente tensionadas que requerem vida longa e estão sujeitas a carregamento de choque. Durezas Rockwell de C50 a C53 são muito comuns, e o material pode ser usado a até 250°C (475°F). Disponível de 0,8 a 12 mm (0,031 a 0,500 in) de diâmetro.

Fonte: De Harold C. R. Carlson, "Selection and Application of Spring Materials", *Mechanical Engineering*, vol. 78, 1956, p. 331-334.

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.

Fonte: *Design Handbook*, 1987, p. 19. Cortesia da Associated Spring.

Tabela 10-5 Propriedades mecânicas de alguns fios de mola

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
			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.

Parte da tabela A 26

Nome da bitola:	Fio de música
7/0	0,012
16/0	0,127
5/0	0,152
4/0	0,178
3/0	0,203
2/0	0,229
0	0,254
1	0,279
2	0,305
3	0,33
4	0,356
5	0,406
6	0,457
7	0,508
8	0,559
9	0,61
10	0,66
11	0,737
12	0,787
13	0,838
14	0,889
15	0,94
16	0,991
17	

6. Dimensionamento

$$4 \leq C \leq 12$$

$$3 < N_a < 15$$

$$F_s = (1 + \zeta)F_{m\acute{a}s}$$

$$\zeta \cong 0,15$$

$$n_s = 1,2$$

$$fom = - (\text{custo relativo do material}) \frac{\gamma \pi^2 d^2 N_t D}{4}$$

Onde: C = índice de mola

N_a = número de espiras ativas

ζ = percurso fracionário até o fechamento

F_s = força até o fechamento

$F_{m\acute{a}s}$ = força máxima admissível antes do escoamento

n_s = fator de segurança no fechamento