LOM3100 Dinâmica - 2017

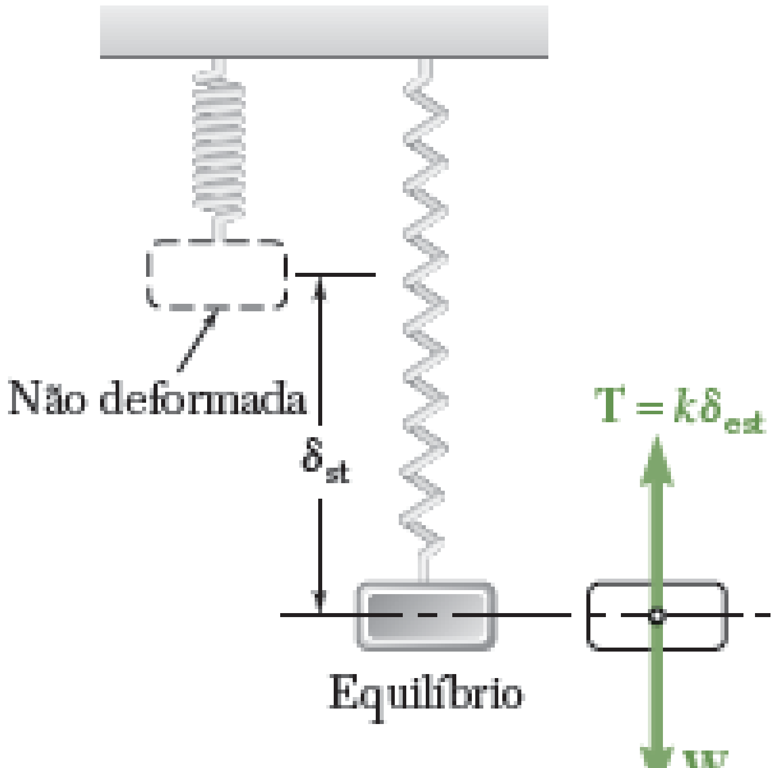
5. Vibrações mecânicas.

Prof. Dr. Viktor Pastoukhov – EEL-USP

Vibrações mecânicas

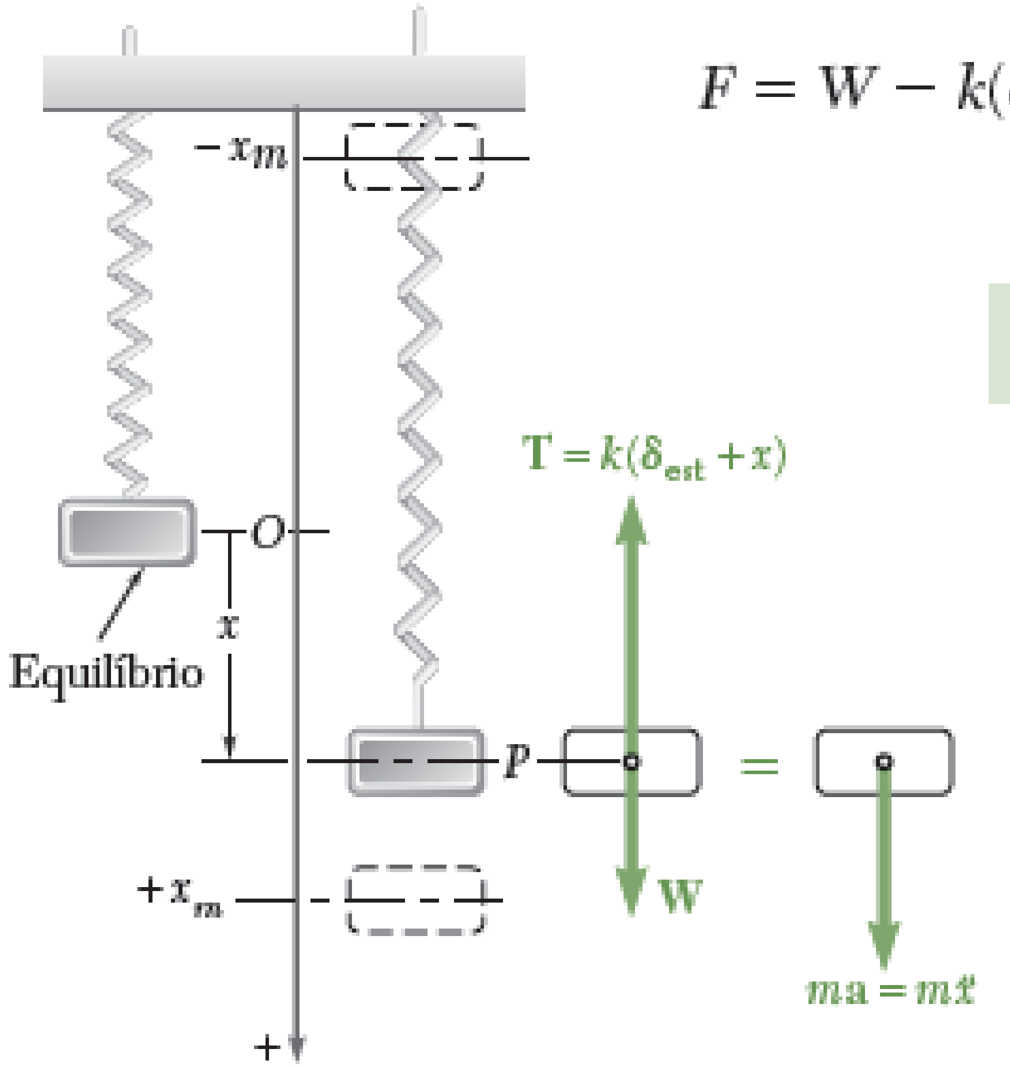
Uma *vibração mecânica* é o movimento de uma partícula ou de um corpo que oscila em torno de uma posição de equilíbrio. A maior parte das vibrações em máquinas e estruturas é indesejável devido ao aumento de tensões e às perdas de energia que as acompanham. Elas deveriam, portanto, ser eliminadas ou reduzidas, tanto quanto possível, por meio de projetos adequados. A análise de vibrações tem se tomado cada vez mais importante nos últimos anos devido à tendência atual por máquinas de altas velocidades e de estruturas mais leves. Existem muitas razões para esperar que essa tendência permaneça e que uma necessidade ainda maior de análise de vibrações ocorra no futuro.

Vibrações livres sem amortecimento



(a)

$$W = k\delta_{est}$$



$$F = W - k(\delta_{est} + x) = -kx$$

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

Movimento harmônico simples

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

$$x = C_1 x_1 + C_2 x_2 = C_1 \operatorname{sen}\left(\sqrt{\frac{k}{m}}\,t\right) + C_2 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}\,t\right)$$

$$\text{Frequência natural circular} = \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\ddot{x} + \omega_n^2\, x = 0$$

$$x = C_1 \operatorname{sen} \omega_n t + C_2 \cos \omega_n t$$

$$v = \dot{x} = C_1 \omega_n \cos \omega_n t - C_2 \omega_n \operatorname{sen} \omega_n t$$

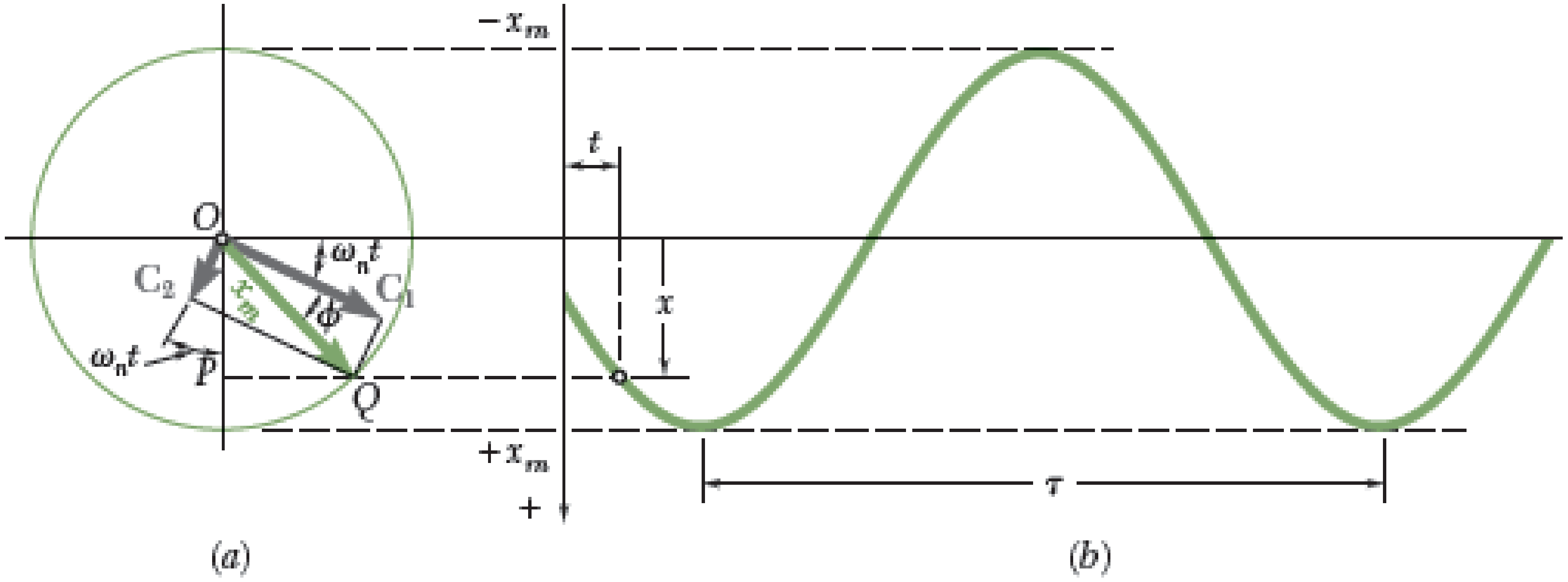
$$a = \ddot{x} = -C_1 \omega_n^2 \operatorname{sen} \omega_n t - C_2 \omega_n^2 \cos \omega_n t$$

Os valores das constantes C_1 e C_2 dependem das *condições iniciais*

$$C_1 = v_0/\omega_n \text{ e } C_2 = x_0.$$

Movimento harmônico simples

$$OP = OQ \text{ sen}(\omega_n t + \phi)$$



$$x = x_m \text{ sen}(\omega_n t + \phi)$$

$$v = \dot{x} = x_m \omega_n \cos(\omega_n t + \phi)$$

$$a = \ddot{x} = -x_m \omega_n^2 \text{ sen}(\omega_n t + \phi)$$

ϕ *ângulo de fase*

$$\text{período} = \tau_n = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

$$\text{Frequência natural} = f_n = \frac{1}{\tau_n} = \frac{\omega_n}{2\pi}$$

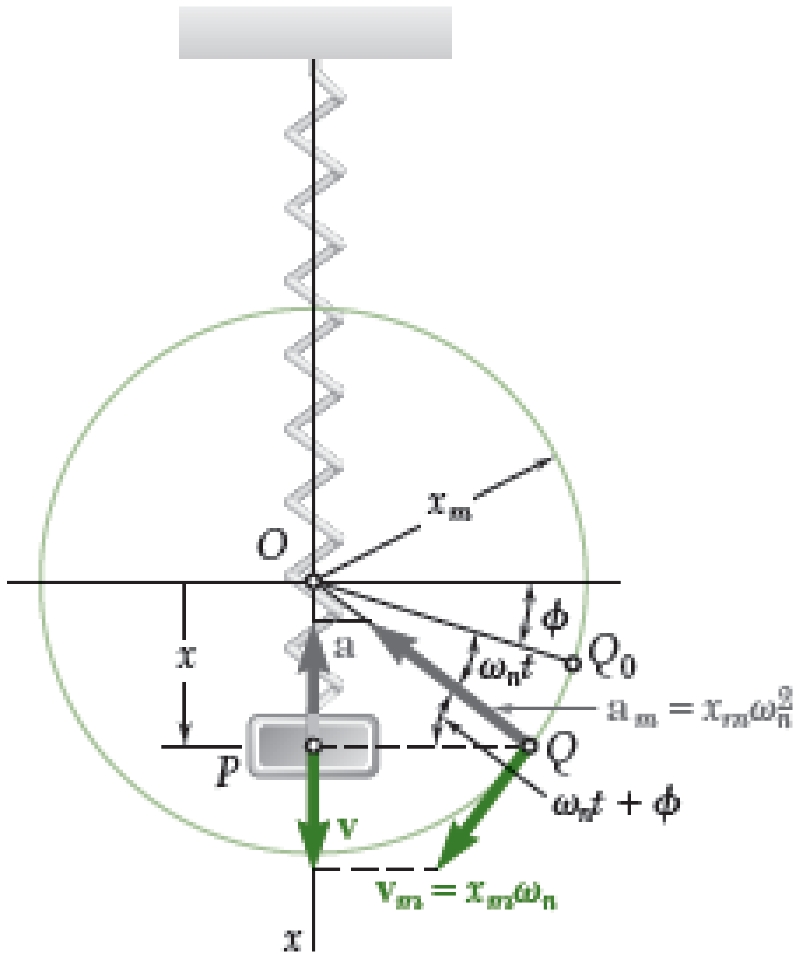
1/s ou s^{-1} *hertz* (Hz)

1 Hz corresponde a uma frequência circular de 2π rad/s.

$1 \text{ rpm} = \frac{1}{60} \text{ Hz} = (2\pi/60) \text{ rad/s}$

Movimento harmônico simples

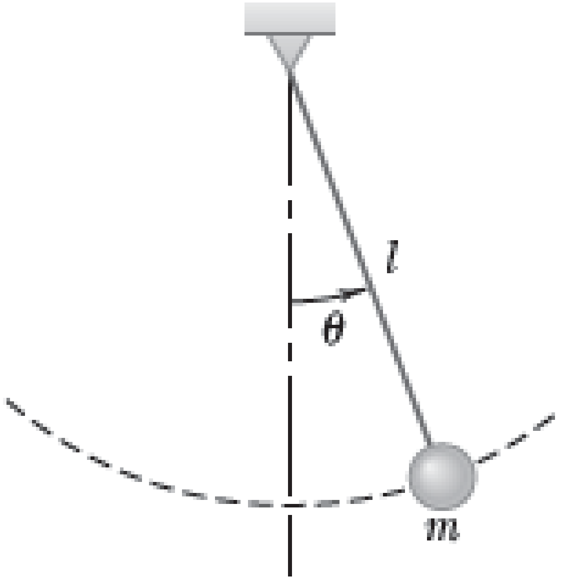
$$v_m = x_m \omega_n \qquad a_m = x_m \omega_n^2$$

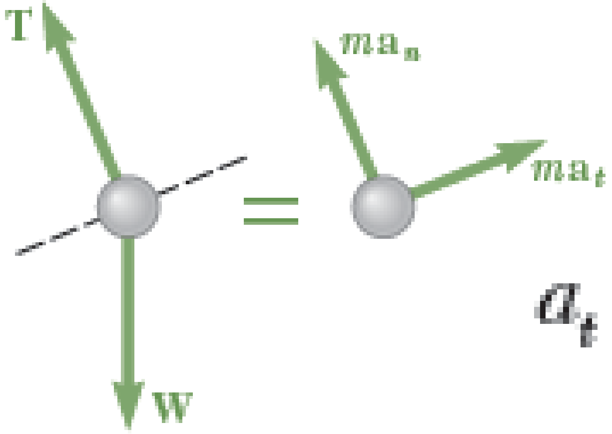


Os resultados obtidos não estão limitados à solução do problema de uma massa ligada a uma mola. Eles podem ser usados para analisar o movimento retilíneo de uma partícula *sempre que a resultante* **F** *das forças que atuam sobre a partícula seja proporcional ao deslocamento x e dirigida para O*. A equação fundamental do movimento $F = ma$ pode então ser escrita sob a forma da Eq. (19.6), que é característica de um movimento harmônico simples. Observando que o coeficiente de x deve ser igual a ω_n^2, podemos facilmente determinar a frequência circular natural ω_n do movimento. Substituindo o valor obtido para ω_n nas Eqs. (19.13) e (19.14), obtemos então o período τ_n e a frequência natural f_n do movimento.

A maioria das vibrações encontradas em aplicações de engenharia pode ser representada por um movimento harmônico simples. Muitas outras, embora de tipos diferentes, podem ser *aproximadas* por um movimento harmônico simples

Pêndulo simples – solução aproximada



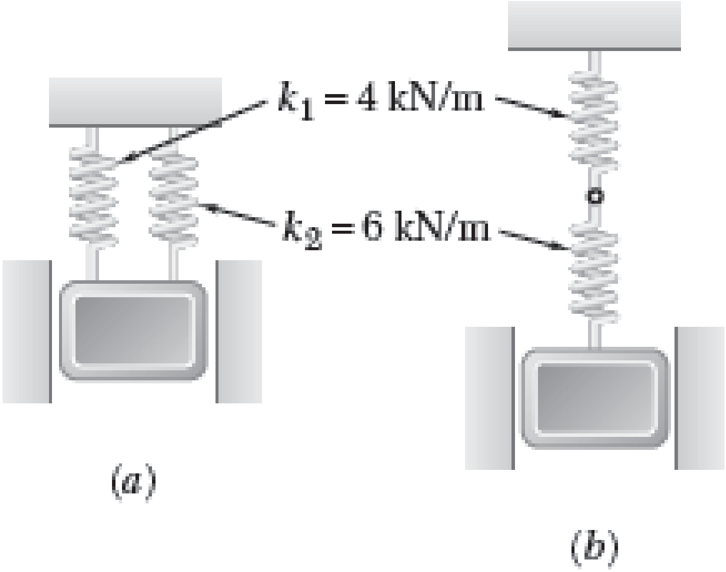


$$a_t = l\alpha = l\ddot{\theta}, \qquad W = mg$$

$$\Sigma F_t = ma_t: \qquad -W \operatorname{sen} \theta = ml\ddot{\theta}$$

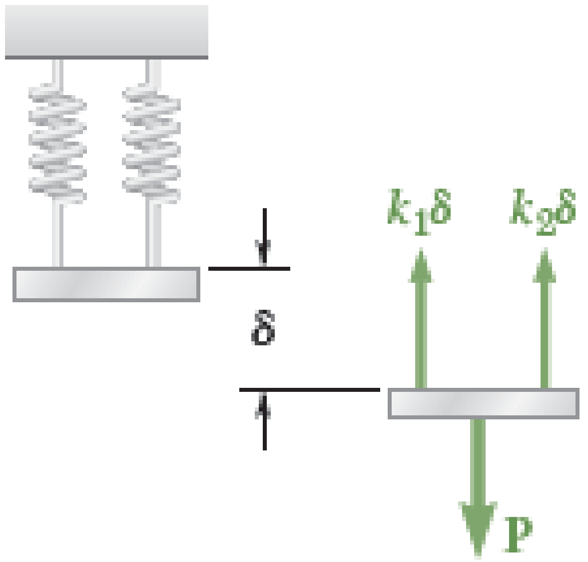
$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \operatorname{sen} \theta = 0 \qquad \ddot{\theta} + \frac{g}{l}\theta = 0 \qquad \omega_n \text{ igual a } (g/l)^{1/2}$$

$$\theta = \theta_m \operatorname{sen}(\omega_n t + \phi) \qquad \tau_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$



PROBLEMA RESOLVIDO 19.1

Um bloco de 50 kg se move entre guias verticais, como mostra a figura. O bloco é puxado até 40 mm abaixo de sua posição de equilíbrio e liberado. Para cada combinação de molas, determine o período da vibração, a velocidade máxima do bloco e a aceleração máxima desse bloco.



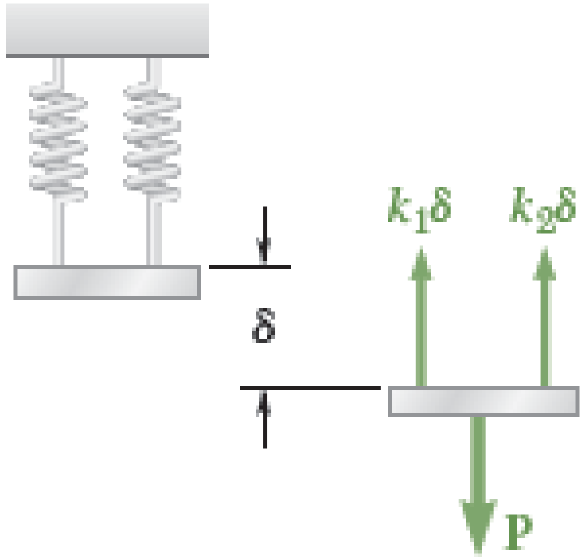
SOLUÇÃO

a. Molas presas em paralelo. Inicialmente, determinamos a constante k de uma mola única equivalente às duas molas, *encontrando a intensidade da força* **P** necessária para produzir uma dada deflexão δ. Uma vez que para uma deflexão δ as intensidades das forças exercidas pelas molas são, respectivamente, $k_1\delta$ e $k_2\delta$, temos

$$P = k_1\delta + k_2\delta = (k_1 + k_2)\delta$$

A constante k da mola única equivalente é

$$k = \frac{P}{\delta} = k_1 + k_2 = 4 \text{ kN/m} + 6 \text{ kN/m} = 10 \text{ kN/m} = 10^4 \text{ N/m}$$



Período de vibração: Como $m = 50$ kg, a Eq. (19.4) resulta em

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} = \frac{10^4\ \text{N/m}}{50\ \text{kg}} \qquad \omega_n = 14{,}14\ \text{rad/s}$$

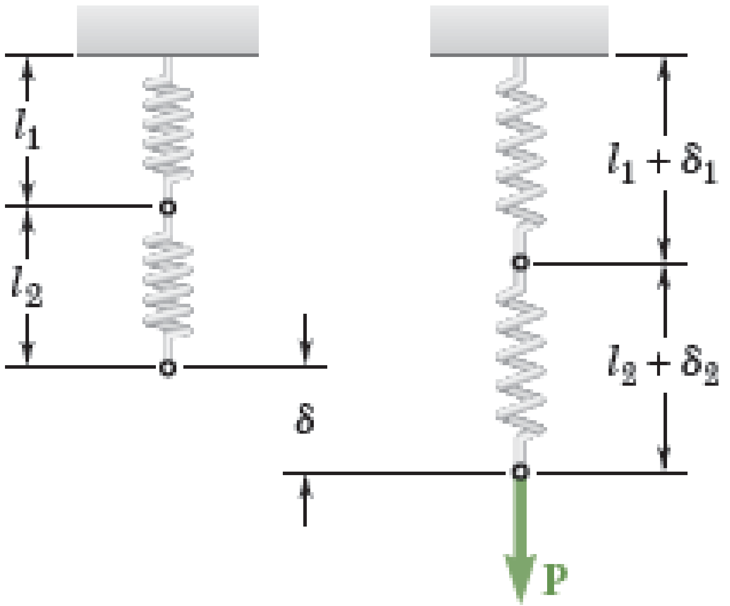
$$\tau_n = 2\pi/\omega_n \qquad \tau_n = 0{,}444\ \text{s} \quad \blacktriangleleft$$

Velocidade máxima: $v_m = x_m\omega_n = (0{,}040\ \text{m})(14{,}14\ \text{rad/s})$

$$v_m = 0{,}566\ \text{m/s} \qquad \mathbf{v}_m = 0{,}566\ \text{m/s} \updownarrow \quad \blacktriangleleft$$

Aceleração máxima: $a_m = x_m\omega_n^2 = (0{,}040\ \text{m})(14{,}14\ \text{rad/s})^2$

$$a_m = 8{,}00\ \text{m/s}^2 \qquad \mathbf{a}_m = 8{,}00\ \text{m/s}^2 \updownarrow \quad \blacktriangleleft$$



b. Molas presas em série. Determinamos inicialmente a constante k da mola única equivalente às duas molas, *encontrando a elongação total* $\boldsymbol{\delta}$ dessas molas sob a ação de uma carga estática dada **P**. Visando facilitar os cálculos, uma carga estática de intensidade $P = 12$ kN é utilizada.

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{P}{k_1} + \frac{P}{k_2} = \frac{12\text{ kN}}{4\text{ kN/m}} + \frac{12\text{ kN}}{6\text{ kN/m}} = 5\text{ m}$$

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{12\text{ kN}}{5\text{ m}} = 2{,}4\text{ kN/m} = 2.400\text{ N/m}$$

Período de vibração: $\omega_n^2 = \dfrac{k}{m} = \dfrac{2.400\text{ N/m}}{50\text{ kg}}$ $\qquad \omega_n = 6{,}93$ rad/s

$$\tau_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \qquad \tau_n = 0{,}907\text{ s} \quad ◀$$

Velocidade máxima: $\omega_m = x_m v_m = (0{,}040\text{ m})(6{,}93\text{ rad/s})$

$$v_m = 0{,}277\text{ m/s} \qquad \mathbf{v}_m = 0{,}277\text{ m/s} \updownarrow \quad ◀$$

Aceleração máxima: $a_m = x_m \omega_n^2 = (0{,}040\text{ m})(6{,}93\text{ rad/s})^2$

$$a_m = 1{,}920\text{ m/s}^2 \qquad \mathbf{a}_m = 1{,}920\text{ m/s}^2 \updownarrow \quad ◀$$

exercícios

Figura P19.4

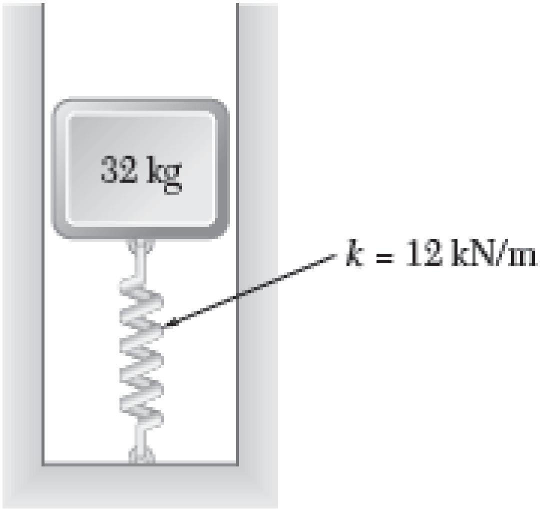


Figura P19.5

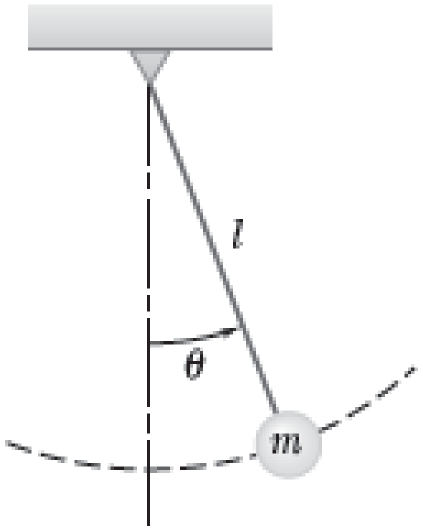
19.2 Determine a amplitude e a velocidade máxima de uma partícula que se move em movimento harmônico simples com uma aceleração máxima de 60 m/s^2 e uma frequência de 40 Hz.

19.3 Uma partícula se move em movimento harmônico simples. Sabendo que a amplitude é de 300 mm e a aceleração máxima é de 5 m/s^2, determine a velocidade máxima da partícula e a frequência de seu movimento.

19.4 Um bloco de 15 kg é suportado pela mola como mostrado na figura. Se o bloco é movido verticalmente para baixo até sua posição de equilíbrio e liberado, determine (*a*) o período e a frequência do movimento resultante, (*b*) a velocidade máxima e a aceleração máxima do bloco se a amplitude de seu movimento é 50 mm.

19.5 Um bloco de 32 kg é ligado a uma mola e pode mover-se sem atrito em um rasgo como mostrado na figura. O bloco está na sua posição de equilíbrio quando é atingido por um martelo que lhe confere uma velocidade inicial de 250 mm/s. Determine (*a*) o período e a frequência do movimento resultante, (*b*) a amplitude do movimento e a aceleração máxima do bloco.

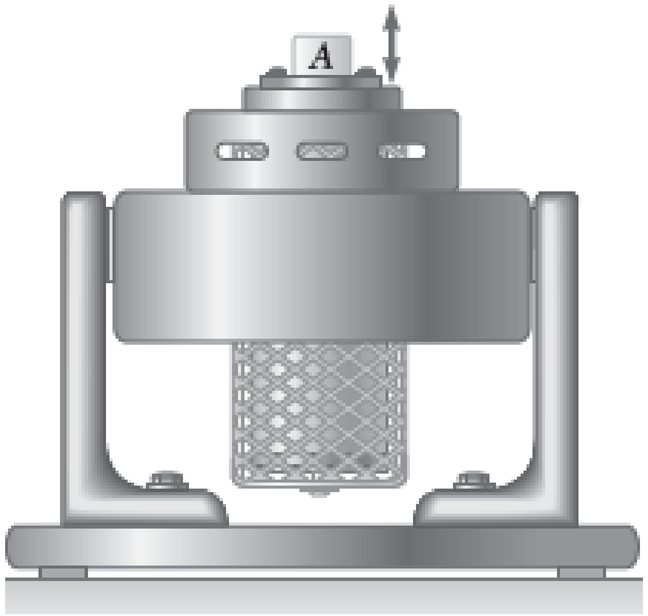
exercícios



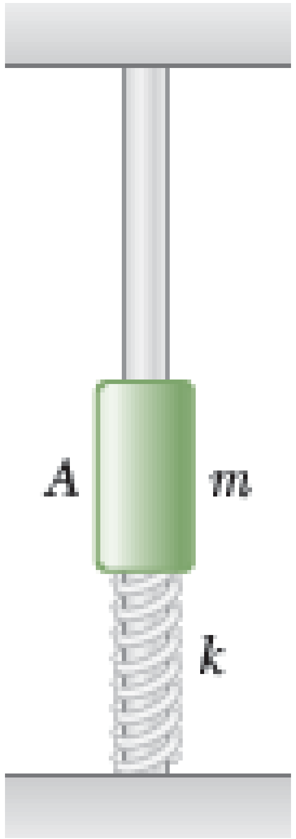
19.6 Um pêndulo simples consistindo de um peso ligado a uma corda oscila em um plano vertical com um período de 1,3 s. Considerando um movimento harmônico simples e sabendo que a velocidade máxima do pêndulo é de 400 mm/s, determine (*a*) a amplitude do movimento em graus, (*b*) a aceleração tangencial máxima do peso.

19.7 Um pêndulo simples consistindo de um peso ligado a uma corda de comprimento $l = 800$ mm oscila em um plano vertical. Considerando um movimento harmônico simples e sabendo que o pêndulo é liberado do repouso quando $\theta = 6°$, determine (*a*) a frequência de oscilação, (*b*) a velocidade máxima do peso.

19.8 Uma caixa de instrumento *A* está aparafusada numa mesa vibratória como mostrado na figura. A mesa se movimenta verticalmente em movimento harmônico simples na mesma frequência do motor de rotação variável que a impulsiona. A caixa deve ser testada para uma aceleração de pico de 50 m/s². Sabendo que a amplitude da mesa vibratória é de 60 mm, determine (*a*) a rotação requerida do motor em rpm, (*b*) a velocidade máxima da mesa.

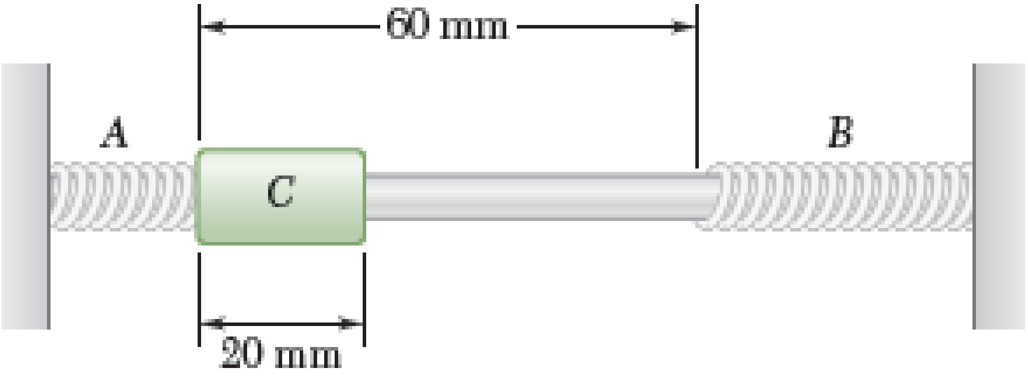


exercícios



19.15 Um colar de 5 kg repousa sobre a mola mostrada na figura, à qual não está preso. Observa-se que quando o colar é empurrado 180 mm ou mais para baixo e liberado, ele perde contato com a mola. Determine (*a*) a constante da mola, (*b*) a posição, a velocidade e a aceleração do colar 0,16 s após ter sido empurrado 180 mm para baixo e liberado.

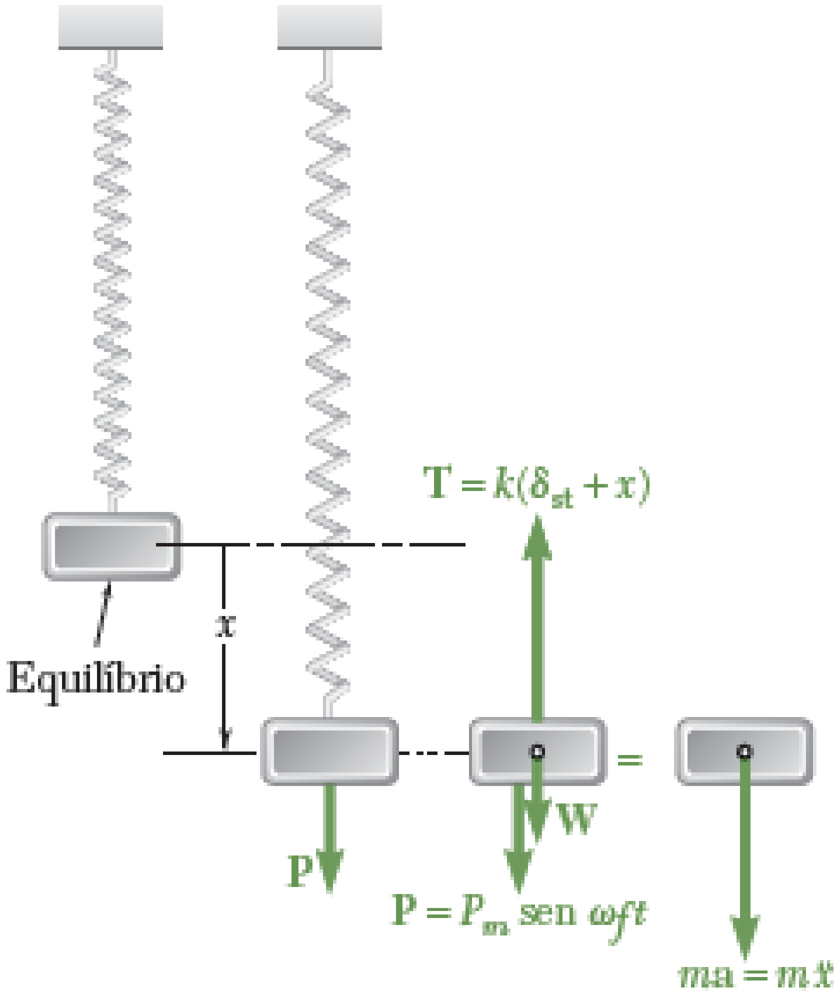
19.16 Um colar *C* de 8 kg pode deslizar sem atrito sobre uma barra horizontal entre duas molas idênticas *A* e *B* nas quais não está preso. Cada mola tem uma constante $k = 600$ N/m. O colar é empurrado para a esquerda contra a mola *A*, comprimindo esta em 20 mm, e liberado na posição mostrada na figura. Ele então desliza ao longo da barra para a direita e atinge a mola *B*. Após comprimir esta mola em 20 mm, o colar desliza para esquerda e atinge a mola *A*, que é comprimida de 20 mm. O ciclo é então repetido. Determine (*a*) o período do movimento do colar, (*b*) a velocidade do colar 1,5 s depois de ter sido liberado. (*Nota:* Isto é um movimento periódico, mas não um movimento harmônico simples.)



Vibrações forçadas

As vibrações mais importantes do ponto de vista de aplicações da engenharia são as *vibrações forçadas* de um sistema. Essas vibrações ocorrem quando um sistema está sujeito a uma força periódica ou quando ele está elasticamente conectado a um suporte que tem um movimento alternado.

Considere primeiramente o caso de um corpo de massa m suspenso por uma mola e sujeito a uma força periódica **P** de intensidade $P = P_m$ sen $\omega_f t$, onde ω_f é a frequência circular de **P** e é referenciada como a *frequência forçada circular* do movimento (Fig. 19.7). Essa força pode ser uma força real externa aplicada ao corpo, ou pode ser uma força centrífuga produzida pela rotação de alguma parte desbalanceada do corpo (veja o Problema Resolvido 19.5). Representando por x o deslocamento do corpo medido a partir de sua posição de equilíbrio, escrevemos a equação de movimento



$$+\downarrow \Sigma F = ma: \qquad P_m \text{ sen } \omega_f t + W - k(\delta_{est} + x) = m\ddot{x}$$

Recordando que $W = k\delta_{est}$, temos

$$m\ddot{x} + kx = P_m \text{ sen } \omega_f t$$

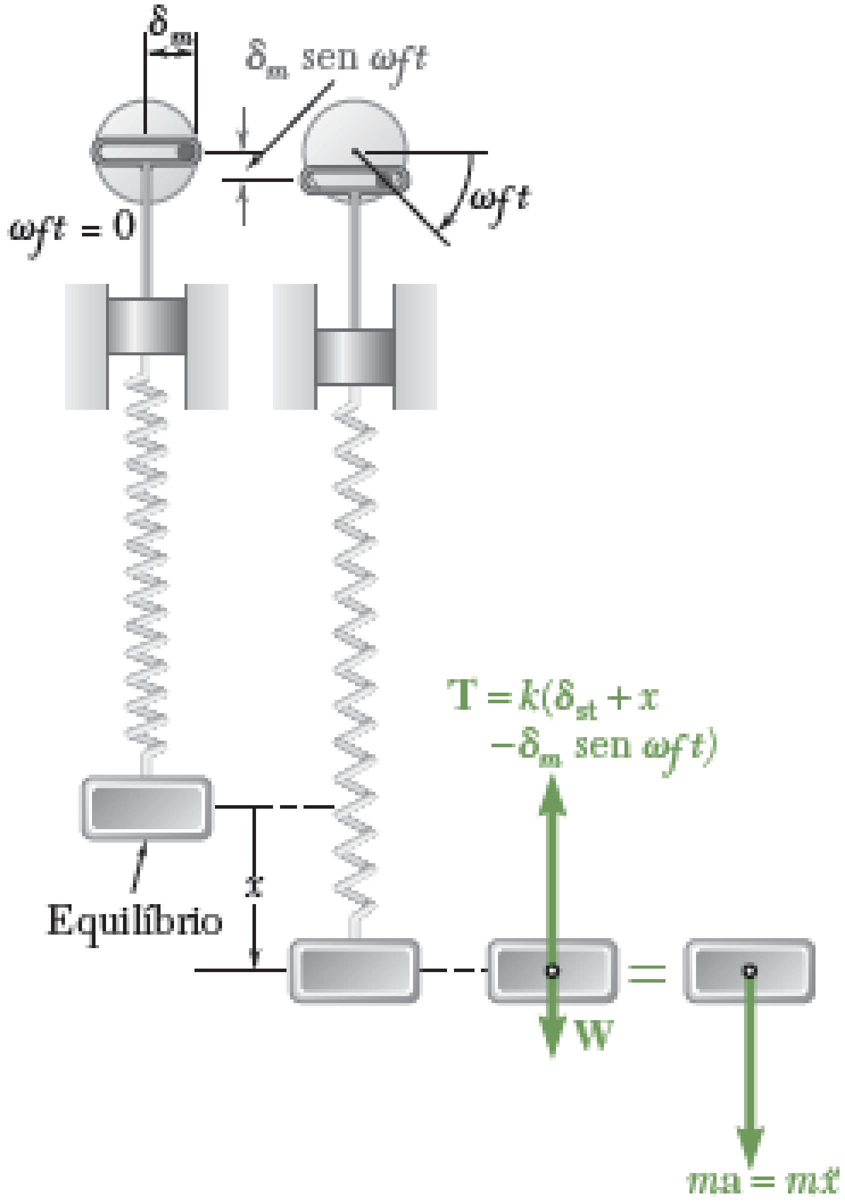
Vibrações forçadas

A seguir, consideramos o caso de um corpo de massa m suspenso por uma mola ligada a um suporte móvel cujo deslocamento δ é igual a δ_m sen $\omega_f t$ (Fig. 19.8). Medindo o deslocamento x do corpo a partir da posição de equilíbrio estático correspondente a $\omega_f t = 0$, encontramos que o elongamento total da mola no instante t é $\delta_{est} + x - \delta_m$ sen $\omega_f t$. A equação do movimento é, então,

$$+\downarrow\Sigma F = ma: \qquad W - k(\delta_{est} + x - \delta_m \operatorname{sen} \omega_f t) = m\ddot{x}$$

Recordando que $W = k\delta_{est}$, temos

$$\boxed{m\ddot{x} + kx = k\delta_m \operatorname{sen} \omega_f t} \tag{19.31}$$



Uma equação diferencial tal como (19.30) ou (19.31), que tem um segundo membro diferente de zero, é chamada *não homogênea*. Sua solução geral é obtida adicionando-se uma solução particular da equação dada à solução geral da correspondente equação *homogênea* (com o segundo membro igual a zero). Uma *solução particular* de (19.30) ou (19.31) pode ser obtida tentando-se uma solução da forma

$$x_{part} = x_m \operatorname{sen} \omega_f t \tag{19.32}$$

Vibrações forçadas

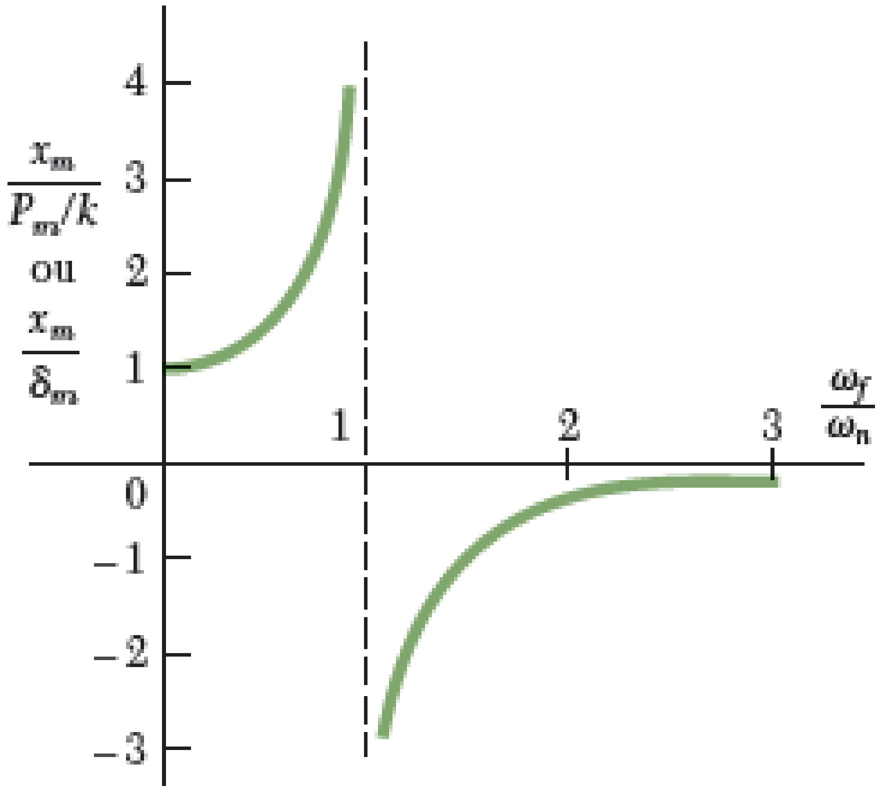
$$x_m = \frac{P_m}{k - m\omega_f^2}$$

$$-m\omega_f^2 x_m \operatorname{sen} \omega_f t + kx_m \operatorname{sen} \omega_f t = P_m \operatorname{sen} \omega_f t$$

$$x_{comp} = C_1 \operatorname{sen} \omega_n t + C_2 \cos \omega_n t$$

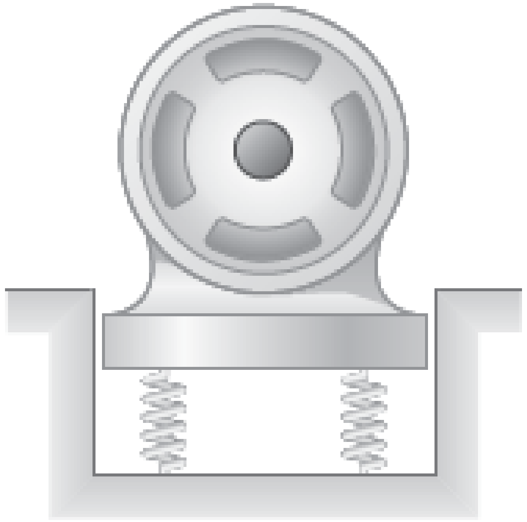
$$x_m = \frac{P_m/k}{1 - (\omega_f/\omega_n)^2} \qquad x_m = \frac{\delta_m}{1 - (\omega_f/\omega_n)^2}$$

$$x = C_1 \operatorname{sen} \omega_n t + C_2 \cos \omega_n t + x_m \operatorname{sen} \omega_f t$$



$$\text{Fator de ampliação} = \frac{x_m}{P_m/k} = \frac{x_m}{\delta_m} = \frac{1}{1 - (\omega_f/\omega_n)^2}$$

$$v_m = x_m \omega_f \qquad a_m = x_m \omega_f^2$$



PROBLEMA RESOLVIDO 19.5

Um motor que pesa 200 kg é suportado por quatro molas, cada uma tendo uma constante de 150 kN/m. O desbalanceamento do rotor é equivalente a um peso de 30 g localizado a 15 cm do eixo de rotação. Sabendo que o motor é restringido a mover-se verticalmente, determine (*a*) a rotação em rpm na qual ocorrerá ressonância, (*b*) a amplitude da vibração do motor a uma rotação de 1.200 rpm.

SOLUÇÃO

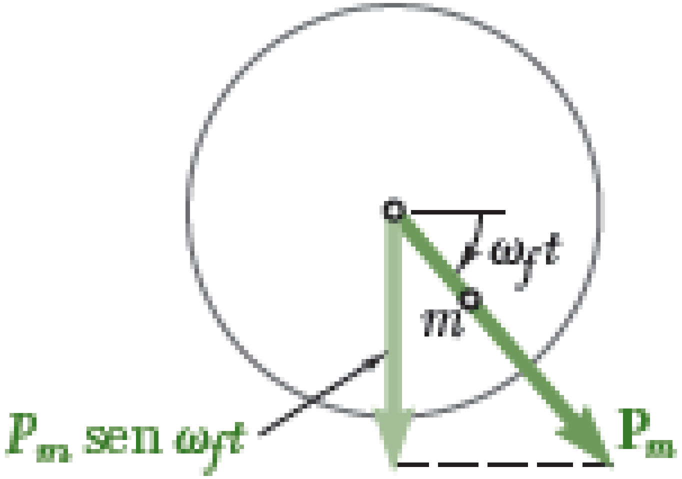
a. Rotação de ressonância. A rotação de ressonância é igual à frequência natural circular ω_n (em rpm) da vibração livre do motor. A massa do motor e a constante equivalente das molas de sustentação são

$$m = 200 \text{ kg}$$

$$k = 4(150 \text{ kN/m}) = 600.000 \text{ N/m}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{600.000}{200}} = 54{,}8 \text{ rad/s} = 523 \text{ rpm}$$

Rotação de ressonância = 523 rpm ◀



b. Amplitude de vibração a 1.200 rpm. A velocidade angular do motor e a massa equivalente ao peso de 0,28 N são

$$\omega_n = 1.200 \text{ rpm} = 125{,}7 \text{ rad/s}$$

$$m = 0{,}03 \text{ kg}$$

A intensidade da força centrífuga causada pelo desbalanceamento do rotor é

$$P_m = ma_n = mr\omega^2 = (0{,}03 \text{ kg})(0{,}15 \text{ m})(125{,}7 \text{ rad/s})^2 = 71{,}1 \text{ N}$$

A deflexão estática que seria causada por uma carga constante P_m é

$$\frac{P_m}{k} = \frac{71{,}1 \text{ N}}{600.000 \text{ N/m}} = \times 1.000 \text{ mm} = 0{,}1185 \text{ mm}$$

A frequência forçada circular ω_f do movimento é a velocidade angular do motor,

$$\omega_f = \omega = 125{,}7 \text{ rad/s}$$

Substituindo os valores de P_m/k, ω_f e ω_n na Eq. (19.33), obtemos

$$x_m = \frac{P_m/k}{1-(\omega_f/\omega_n)^2} = \frac{0{,}1185 \text{ mm}}{1-(125{,}7/54{,}8)^2} = -0{,}0278 \text{ mm}$$

$x_m = 0{,}0278$ mm (defasado) ◀

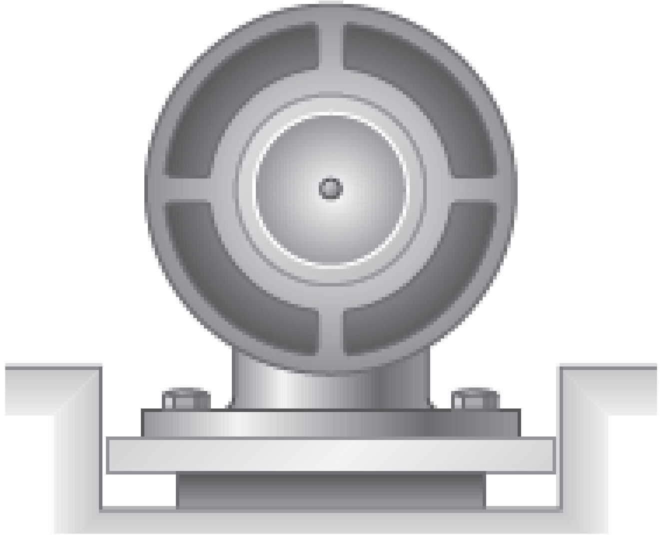
exercícios

19.100 Um cursor de 5 kg pode deslizar sobre uma barra horizontal sem atrito e está ligado a uma mola de constante 550 N/m. Sobre ele atua uma força periódica de intensidade $P = P_m \operatorname{sen} \omega_f t$, onde $P_m = 15$ N. Determine a amplitude do movimento do cursor se (*a*) $\omega_f = 5$ rad/s, (*b*) $\omega_f = 10$ rad/s.

19.101 Um cursor de 5 kg pode deslizar sobre uma barra horizontal sem atrito e está ligado a uma mola de constante k. Sobre ele atua uma força periódica de intensidade $P = P_m \operatorname{sen} \omega_f t$, onde $P_m = 10$ N e $\omega_f = 5$ rad/s. Determine o valor da constante de mola k sabendo que o movimento do cursor tem uma amplitude de 150 mm e está (*a*) em fase com a força aplicada, (*b*) defasado com a força aplicada.

19.102 Um cursor de massa m que desliza sobre uma barra horizontal sem atrito está ligado a uma mola de constante k e sobre ele atua uma força periódica de intensidade $P = P_m \operatorname{sen} \omega_f t$. Determine o intervalo de valores de ω_f para o qual a amplitude da vibração excede três vezes a deflexão estática causada por uma força constante de intensidade P_m.

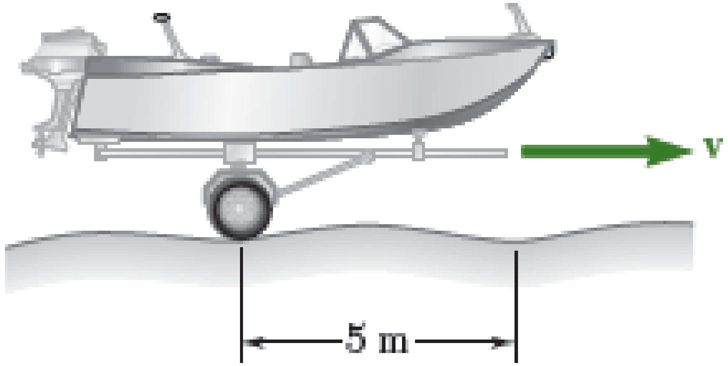
exercícios



19.119 O desbalanceamento do rotor de um motor de 200 kg é equivalente a uma massa de 100 g localizada a 150 mm do eixo de rotação. A fim de limitar para 1 N a intensidade da força oscilante exercida na fundação quando o motor gira a velocidades de 100 rpm ou acima, uma base amortecedora é colocada entre o motor e a fundação. Determine (*a*) a constante máxima admissível da mola k da base, (*b*) a amplitude correspondente da força oscilante exercida na fundação quando o motor está girando a 200 rpm.

19.120 Um motor de 180 kg é suportado por molas de constante total 150 kN/m. O desbalanceamento do rotor é equivalente a uma massa de 28 g localizado a 150 mm do eixo de rotação. Determine o intervalo de velocidades do motor para o qual a amplitude da força oscilante exercida na fundação é menor que 20 N.

19.125 Um pequeno reboque e sua carga têm uma massa total de 250 kg. O reboque é suportado por duas molas, cada uma de constante 10 kN/m, e puxado sobre uma estrada cuja superfície pode ser aproximada por uma curva senoidal com amplitude de 40 mm e comprimento de onda de 5 m (ou seja, a distância entre cristas sucessivas é de 5 m e a distância vertical da crista para a depressão é de 80 mm). Determine (*a*) a velocidade em que ocorrerá ressonância, (*b*) a amplitude da vibração do reboque a uma velocidade de 50 km/h.



Vibrações livres amortecidas

Como um exemplo, vamos novamente considerar um corpo de massa m suspenso por uma mola de constante k, considerando que o corpo está ligado ao êmbolo de um amortecedor (Fig. 19.10). A intensidade da força de atrito exercida sobre o êmbolo pelo fluido que o envolve é igual a $c\dot{x}$; onde a constante c, expressa em N · s/m e conhecida como o *coeficiente de amortecimento viscoso*, depende das propriedades físicas do fluido e da construção do amortecedor. A equação de movimento é

$$+\downarrow\Sigma F = ma: \qquad W - k(\delta_{est} + x) - c\dot{x} = m\ddot{x}$$

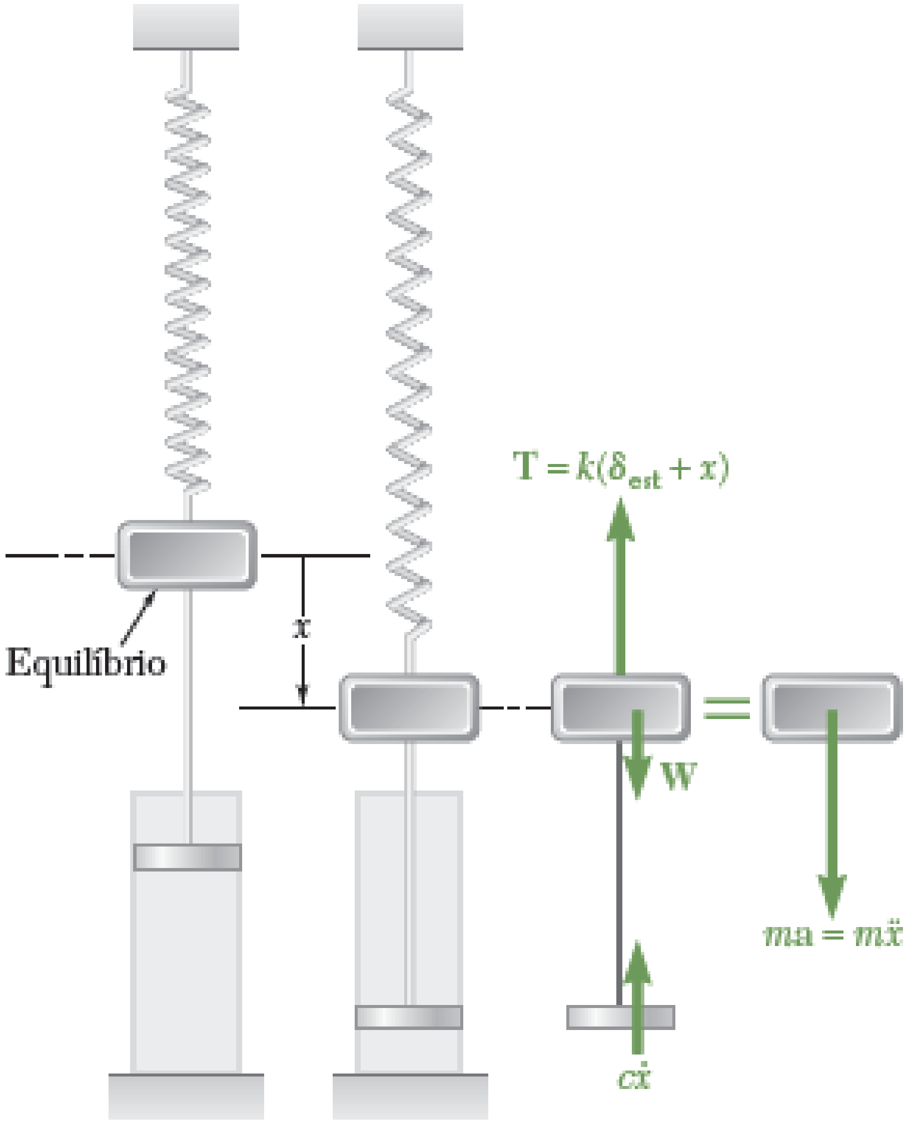
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \qquad x = e^{\lambda t}$$

equação característica

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0 \qquad \lambda = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$$

coeficiente de amortecimento crucial c_c

$$\left(\frac{c_c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0 \qquad c_c = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n$$



Vibrações livres amortecidas

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

1. *Amortecimento supercrucial; $c > c_c$.* As raízes λ_1 e λ_2 da equação característica (19.39) são reais e distintas e a solução geral da equação diferencial (19.38) é

$$x = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \tag{19.42}$$

Essa solução corresponde a um movimento não vibratório. Como λ_1 e λ_2 são negativos, x tende a zero quando t aumenta indefinidamente. Contudo, o sistema na realidade retorna à sua posição de equilíbrio após um tempo finito.

2. *Amortecimento crucial: $c = c_c$.* A equação característica tem uma raiz dupla $\lambda = -c_c/2m = -\omega_n$ e a solução geral de (19.38) é

$$x = (C_1 + C_2 t)e^{-\omega_n t} \tag{19.43}$$

O movimento obtido é novamente não vibratório. Sistemas criticamente amortecidos são de interesse especial em aplicações de engenharia, pois eles retornam à sua posição de equilíbrio no menor tempo possível sem oscilação.

Vibrações livres amortecidas

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

3. *Amortecimento subcrucial:* $c < c_c$ As raízes da Eq. (19.39) são complexas e conjugadas, e a solução geral de (19.38) é da forma

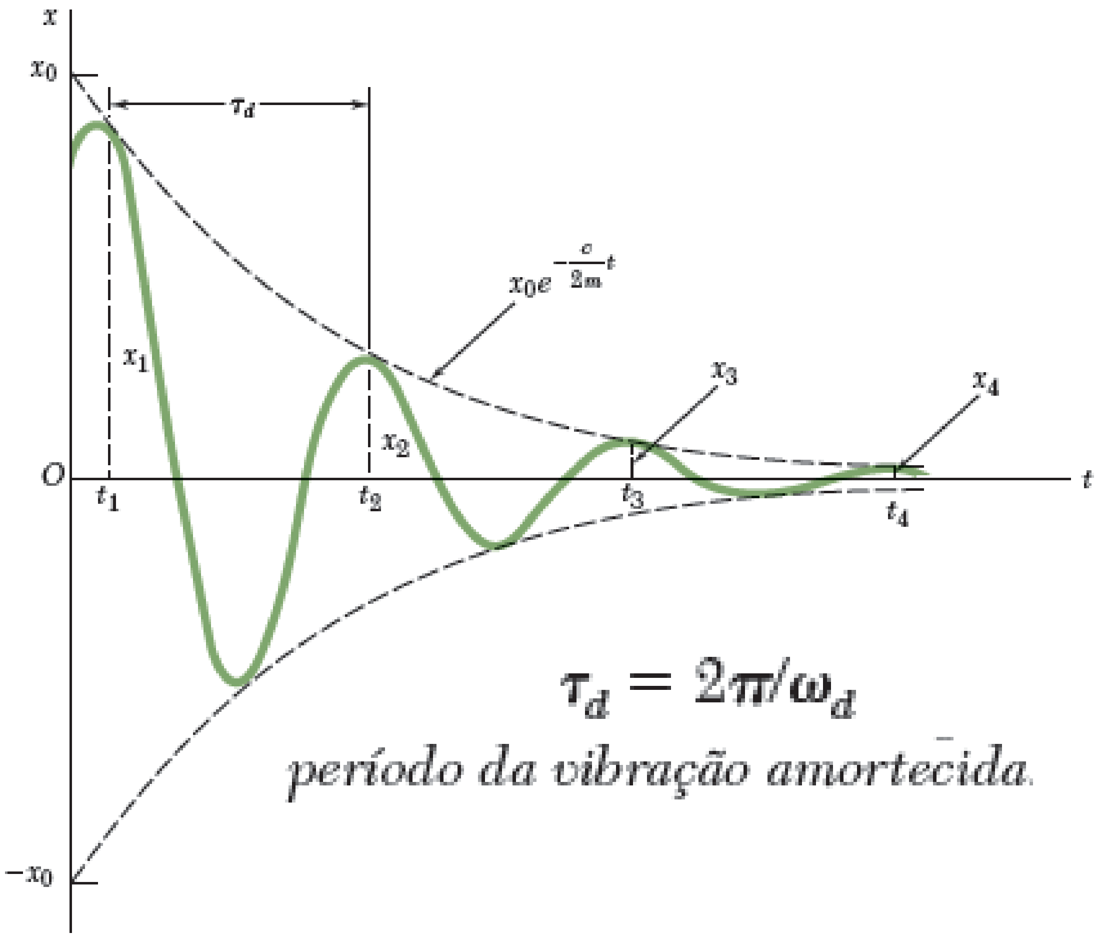
$$x = e^{-(c/2m)t}(C_1 \text{ sen } \omega_d t + C_2 \cos \omega_d t) \qquad (19.44)$$

$$\omega_d^2 = \frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2 \qquad \omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2} \qquad \omega_d < \omega_n$$

ω_d *frequência circular* da vibração amortecida

c/c_c *fator de amortecimento*

$$x = x_0 e^{-(c/2m)t} \text{ sen } (\omega_d t + \phi)$$



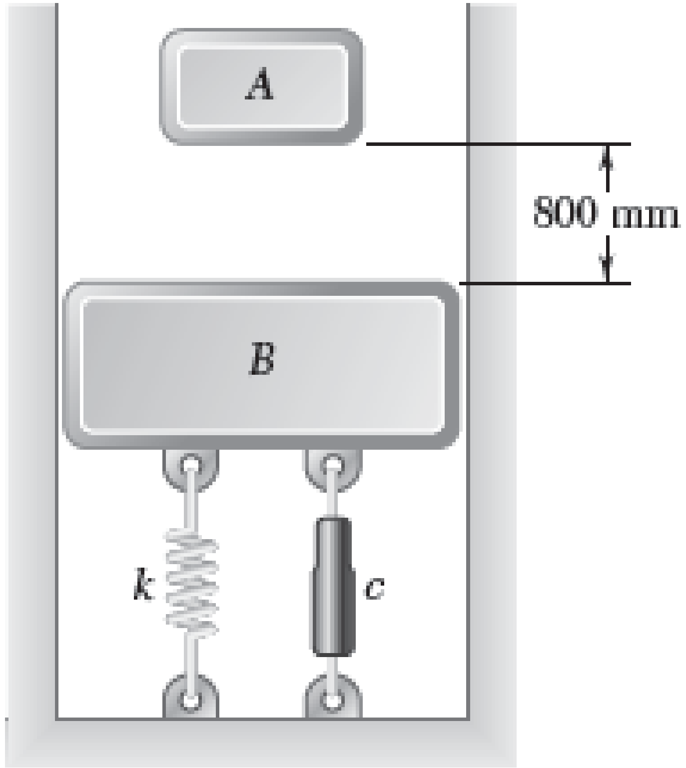
$$\tau_d = 2\pi/\omega_d$$

período da vibração amortecida

exercícios

19.127 Mostre que, no caso de amortecimento supercrucial ($c > c_c$), um corpo nunca passa pela sua posição de equilíbrio O (*a*) se ele é liberado sem velocidade inicial de uma posição arbitrária, ou (*b*) se ele parte de O com uma velocidade inicial arbitrária.

19.128 Mostre que, no caso de amortecimento supercrucial ($c > c_c$), um corpo liberado de uma posição arbitrária com uma velocidade inicial arbitrária não pode passar mais de uma vez pela sua posição de equilíbrio.



19.134 Um bloco A de 4 kg é solto de uma altura de 800 mm sobre um bloco B de 9 kg que está em repouso. O bloco B é suportado por uma mola de constante k = 1.500 N/m e está unido a um amortecedor de coeficiente de amortecimento c = 230 N · s/m. Sabendo que não há rebote, determine a distância máxima a que os blocos vão se mover após o impacto.