

FORÇA E MOVIMENTO – I

5

5-1

O QUE É FÍSICA?

Vimos que a física envolve o estudo do movimento dos objetos, incluindo a aceleração, que é uma variação de velocidade. A física também envolve o estudo da causa da aceleração. A causa é sempre uma **força**, que pode ser definida, em termos coloquiais, como um empurrão ou um puxão exercido sobre um objeto. Dizemos que a força *age* sobre o objeto, mudando a velocidade. Por exemplo: na largada de uma prova de Fórmula 1, uma força exercida pela pista sobre os pneus traseiros provoca a aceleração dos veículos. Quando um zagueiro segura o centroavante do time adversário, uma força exercida pelo defensor provoca a desaceleração do atacante. Quando um carro colide com um poste, uma força exercida pelo poste faz com que o carro pare bruscamente. As revistas de ciência, engenharia, direito e medicina estão repletas de artigos sobre as forças a que estão sujeitos os objetos, entre os quais podem ser incluídos os seres humanos.

5-2 Mecânica Newtoniana

A relação que existe entre uma força e aceleração produzida por essa força foi descoberta por Isaac Newton (1642–1727) e é o assunto deste capítulo. O estudo da relação, da forma como foi apresentada por Newton, é chamado de *mecânica newtoniana*. Vamos nos concentrar inicialmente nas três leis básicas de movimento da mecânica newtoniana.

A mecânica newtoniana não pode ser aplicada a todas as situações. Se as velocidades dos corpos envolvidos são muito elevadas, comparáveis à velocidade da luz, a mecânica newtoniana deve ser substituída pela teoria da relatividade restrita de Einstein, que é válida para qualquer velocidade. Se os corpos envolvidos são muito pequenos, de dimensões atômicas ou subatômicas (como, por exemplo, os elétrons de um átomo), a mecânica newtoniana deve ser substituída pela mecânica quântica. Atualmente, os físicos consideram a mecânica newtoniana um caso especial dessas duas teorias mais abrangentes. Ainda assim, trata-se de um caso especial muito importante, já que pode ser aplicado ao estudo do movimento dos mais diversos objetos, desde corpos muito pequenos (quase de dimensões atômicas) até corpos muito grandes (galáxias e aglomerados de galáxias).

5-3 A Primeira Lei de Newton

Antes de Newton formular sua mecânica, pensava-se que uma influência, uma “força”, era necessária para manter um corpo em movimento com velocidade constante e que um corpo estava em seu “estado natural” apenas quando se encontrava em repouso. Para que um corpo se movesse com velocidade constante, tinha que ser impulsionado de alguma forma, puxado ou empurrado; se não fosse assim, pararia “naturalmente”.

Essas ideias pareciam razoáveis. Se você faz um disco de metal deslizar em uma superfície de madeira, o disco realmente diminui de velocidade até parar. Para que

continue a deslizar indefinidamente com velocidade constante, deve ser empurrado ou puxado continuamente.

Por outro lado, se o disco for lançado em um rinque de patinação, percorrerá uma distância bem maior antes de parar. É possível imaginar superfícies mais escorregadias, nas quais o disco percorreria distâncias ainda maiores. No limite, podemos pensar em uma superfície extremamente escorregadia (conhecida como **superfície sem atrito**), na qual o disco não diminuiria de velocidade. (Podemos, de fato, chegar muito perto dessa situação fazendo o disco deslizar em uma mesa de ar, na qual é sustentado por uma corrente de ar.)

A partir dessas observações, podemos concluir que um corpo manterá seu estado de movimento com velocidade constante se nenhuma força agir sobre ele. Isso nos leva à primeira das três leis de Newton.



Primeira Lei de Newton Se nenhuma força atua sobre um corpo, sua velocidade não pode mudar, ou seja, o corpo não pode sofrer uma aceleração.

Em outras palavras, se o corpo está em repouso, permanece em repouso; se está em movimento, continua com a mesma velocidade (mesmo módulo e mesma orientação).

5-4 Força

Vamos agora definir a unidade de força. Sabemos que uma força pode causar a aceleração de um corpo. Assim, definimos a unidade de força em termos da aceleração que uma força imprime a um corpo de referência, que tomamos como sendo o quilograma-padrão da Fig. 1-3. A esse corpo foi atribuída, exatamente e por definição, uma massa de 1 kg.

Colocamos o corpo-padrão sobre uma mesa horizontal sem atrito e o puxamos para a direita (Fig. 5-1) até que, por tentativa e erro, adquira uma aceleração de 1 m/s^2 . Declaramos então, a título de definição, que a força que estamos exercendo sobre o corpo-padrão tem um módulo de 1 newton (1 N).

Podemos exercer uma força de 2 N sobre nosso corpo-padrão puxando-o até a aceleração medida de 2 m/s^2 , e assim por diante. No caso geral, se nosso corpo-padrão de massa igual a 1 kg tem uma aceleração de módulo a , sabemos que uma força F está agindo sobre o corpo e que o módulo da força (em newtons) é igual ao módulo da aceleração (em metros por segundo quadrado).

Uma força é medida, portanto, pela aceleração que produz. Entretanto, a aceleração é uma grandeza vetorial, pois possui um módulo e uma orientação. A força também é uma grandeza vetorial? Podemos facilmente atribuir uma orientação a uma força (basta atribuir-lhe a orientação da aceleração), mas isso não é suficiente. Devemos provar experimentalmente que as forças são grandezas vetoriais. Na realidade, isso foi feito há muito tempo. As forças são realmente grandezas vetoriais: possuem um módulo e uma orientação e se combinam de acordo com as regras vetoriais do Capítulo 3.

Isso significa que, quando duas ou mais forças atuam sobre um corpo, podemos calcular a **força total**, ou **força resultante**, somando vetorialmente as forças. Uma única força com o módulo e a orientação da força resultante tem o mesmo efeito sobre um corpo que todas as forças agindo simultaneamente. Este fato é chamado de **princípio de superposição para forças**. O mundo seria muito estranho se, por exemplo, você e outra pessoa puxassem o corpo-padrão na mesma orientação, cada um com uma força de 1 N, e a força resultante fosse 14 N.

Neste livro, as forças são quase sempre representadas por um símbolo como \vec{F} e as forças resultantes por um símbolo como \vec{F}_{res} . Assim como acontece com outros vetores, uma força ou uma força resultante pode ter componentes em relação a um

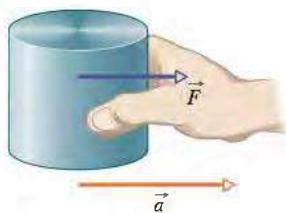


Figura 5-1 Uma força \vec{F} aplicada ao quilograma-padrão provoca uma aceleração \vec{a} .

sistema de coordenadas. Quando as forças atuam apenas em uma direção, possuem apenas uma componente. Nesse caso, podemos dispensar a seta sobre os símbolos das forças e usar apenas sinais para indicar o sentido das forças ao longo do único eixo.

Um enunciado mais rigoroso da Primeira Lei de Newton da Seção 5-3, baseado na ideia de força resultante, é o seguinte:



Primeira Lei de Newton Se nenhuma força *resultante* atua sobre um corpo ($\vec{F}_{\text{res}} = 0$), a velocidade não pode mudar, ou seja, o corpo não pode sofrer uma aceleração.

Isso significa que mesmo que um corpo esteja submetido a várias forças, se a resultante dessas forças for zero, o corpo não sofrerá uma aceleração.

Referenciais Inerciais

A primeira lei de Newton não se aplica a todos os referenciais, mas podemos sempre encontrar referenciais nos quais essa lei (na verdade, toda a mecânica newtoniana) é verdadeira. Esses referenciais são chamados de **referenciais inerciais**.

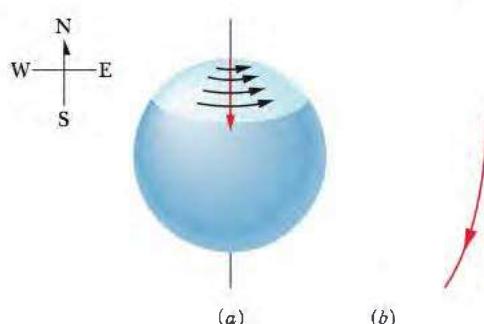


Referencial inercial é um referencial para o qual as leis de Newton são válidas.

Por exemplo: podemos supor que o solo é um referencial inercial, desde que possamos desprezar os movimentos astronômicos da Terra (como a rotação e a translação).

Esta hipótese é válida se, digamos, fazemos deslizar um disco metálico em uma pista *curta* de gelo (supondo que a resistência que o gelo oferece ao movimento seja tão pequena que pode ser desprezada); descobrimos que o movimento do disco obedece às leis de Newton. Suponha, porém, que o disco deslize sobre uma *longa* pista de gelo a partir do polo norte (Fig. 5-2a). Se observamos o disco a partir de um referencial estacionário no espaço, constataremos que o disco se move para o sul ao longo de uma trajetória retilínea, já que a rotação da Terra em torno do polo norte simplesmente faz o gelo escorregar por baixo do disco. Entretanto, se observamos o disco de um ponto do solo, que acompanha a rotação da Terra, a trajetória do disco não é uma reta. Como a velocidade do solo sob o disco, dirigida para leste, aumenta com a distância entre o disco e o polo, do nosso ponto de observação fixo no solo o disco parece sofrer um desvio para oeste (Fig. 5-2b). Essa deflexão aparente não é causada por uma força, como exigem as leis de Newton, mas pelo fato de que observamos o disco a partir de um referencial em rotação. Nessa situação, o solo é um referencial **não inercial**.

Neste livro, supomos quase sempre que o solo é um referencial inercial e que as forças e acelerações são medidas neste referencial. Quando as medidas são executadas em um referencial não inercial, como, por exemplo, um elevador acelerado em relação ao solo, os resultados podem ser surpreendentes.

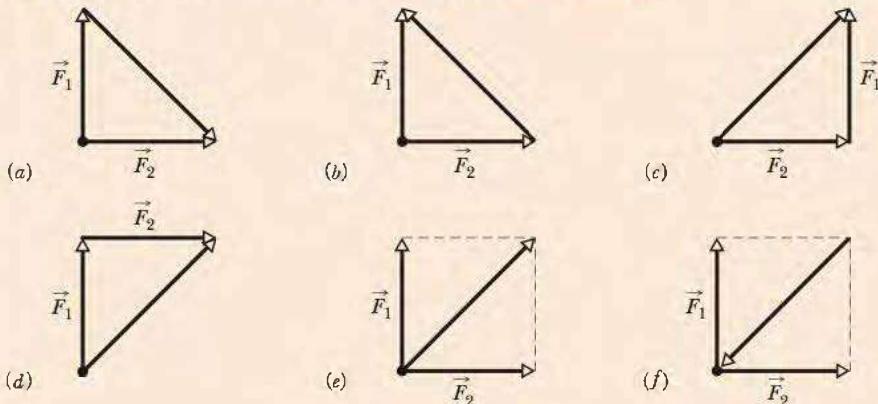


A rotação da Terra causa um desvio aparente.

Figura 5-2 (a) A trajetória de um disco que escorrega a partir do polo norte, do ponto de vista de um observador estacionário no espaço. A Terra gira para leste. (b) A trajetória do disco do ponto de vista de um observador no solo.

 **TESTE 1**

Quais dos seis arranjos da figura mostram corretamente a soma vetorial das forças \vec{F}_1 e \vec{F}_2 para obter um terceiro vetor, que representa a força resultante \vec{F}_{rv} ?



5-5 Massa

A experiência nos diz que uma dada força produz acelerações de módulos diferentes em corpos diferentes. Coloque no chão uma bola de futebol e uma bola de boliche e chute as duas. Mesmo que você não faça isso de verdade, sabe qual será o resultado: a bola de futebol receberá uma aceleração muito maior que a bola de boliche. As duas acelerações são diferentes porque a massa da bola de futebol é diferente da massa da bola de boliche; mas o que, exatamente, é a massa?

Podemos explicar como medir a massa imaginando uma série de experimentos em um referencial inercial. No primeiro experimento, exercemos uma força sobre um corpo padrão, cuja massa m_0 é definida com 1,0 kg. Suponha que o corpo padrão sofra uma aceleração de 1,0 m/s². Podemos dizer então que a força que atua sobre esse corpo é 1,0 N.

Em seguida, aplicamos a mesma força (precisaríamos nos certificar, de alguma forma, de que a força é a mesma) a um segundo corpo, o corpo X, cuja massa não é conhecida. Suponha que descobrimos que esse corpo sofre uma aceleração de 0,25 m/s². Sabemos que uma bola de futebol, que possui uma *massa menor*, adquire uma *aceleração maior* que uma bola de boliche, quando a mesma força (chute) é aplicada a ambas. Vamos fazer a seguinte conjectura: a razão entre as massas de dois corpos é igual ao inverso da razão entre as acelerações que adquirem quando são submetidos à mesma força. Para o corpo X e o corpo padrão, isso significa que

$$\frac{m_X}{m_0} = \frac{a_0}{a_X}.$$

Explicitando m_X , obtemos

$$m_X = m_0 \frac{a_0}{a_X} = (1,0 \text{ kg}) \frac{1,0 \text{ m/s}^2}{0,25 \text{ m/s}^2} = 4,0 \text{ kg}.$$

Nossa conjectura será útil, evidentemente, apenas se continuar a ser válida quando a força aplicada assumir outros valores. Por exemplo: quando aplicamos uma força de 8,0 N a um corpo padrão, obtemos uma aceleração de 8,0 m/s². Quando a força de 8,0 N é aplicada ao corpo X, obtemos uma aceleração de 2,0 m/s². Nossa conjectura nos dá, portanto,

$$m_X = m_0 \frac{a_0}{a_X} = (1,0 \text{ kg}) \frac{8,0 \text{ m/s}^2}{2,0 \text{ m/s}^2} = 4,0 \text{ kg},$$

o que é compatível com o primeiro experimento. Muitos experimentos que forne-

cem resultados semelhantes indicam que nossa conjectura é uma forma confiável de atribuir uma massa a um dado corpo.

Nossos experimentos indicam que massa é uma propriedade *intrínseca* de um corpo, ou seja, uma característica que resulta automaticamente da existência do corpo. Indicam também que a massa é uma grandeza escalar. Contudo, uma pergunta intrigante permanece sem resposta: o que, exatamente, é massa?

Como a palavra *massa* é usada na vida cotidiana, devemos ter uma noção intuitiva de massa, talvez algo que podemos sentir fisicamente. Seria o tamanho, o peso ou a densidade do corpo? A resposta é negativa, embora algumas vezes essas características sejam confundidas com a massa. Podemos apenas dizer que *a massa de um corpo é a propriedade que relaciona uma força que age sobre o corpo à aceleração resultante*. A massa não tem uma definição mais coloquial; você pode ter uma sensação física da massa apenas quando tenta acelerar um corpo, como ao chutar uma bola de futebol ou uma bola de boliche.

5-6 A Segunda Lei de Newton

Todas as definições, experimentos e observações que discutimos até aqui podem ser resumidos em uma única sentença:



Segunda Lei de Newton A força resultante que age sobre um corpo é igual ao produto da massa do corpo pela aceleração.

Em termos matemáticos,

$$\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a} \quad (\text{segunda lei de Newton}). \quad (5-1)$$

Esta equação é simples, mas devemos usá-la com cautela. Primeiro, devemos escolher o corpo ao qual vamos aplicá-la; \vec{F}_{res} deve ser a soma vetorial de *todas* as forças que atuam sobre *esse* corpo. Apenas as forças que atuam sobre *esse* corpo devem ser incluídas na soma vetorial, não as forças que agem sobre *outros* corpos envolvidos na mesma situação. Por exemplo: se você disputa a bola com vários adversários em um jogo de futebol, a força resultante que age sobre *você* é a soma vetorial de todos os empurrões e puxões que *você* recebe. Ela não inclui um empurrão ou puxão que você dá em *outro* jogador. Toda vez que resolvemos um problema que envolve forças, o primeiro passo é definir claramente a que corpo vamos aplicar a segunda lei de Newton.

Como outras equações vetoriais, a Eq. 5-1 é equivalente a três equações para as componentes, uma para cada eixo de um sistema de coordenadas *xyz*:

$$F_{\text{res},x} = ma_x, \quad F_{\text{res},y} = ma_y, \quad \text{e} \quad F_{\text{res},z} = ma_z. \quad (5-2)$$

Cada uma dessas equações relaciona a componente da força resultante em relação a um eixo à aceleração ao longo do mesmo eixo. Por exemplo: a primeira equação nos diz que a soma de todas as componentes das forças em relação ao eixo *x* produz a componente a_x da aceleração do corpo, mas não produz uma aceleração nas direções *y* e *z*. Sendo assim, a componente a_x da aceleração é causada apenas pelas componentes das forças em relação ao eixo *x*. Generalizando,



A componente da aceleração em relação a um dado eixo é causada *apenas* pela soma das componentes das forças em relação a *esse* eixo e não por componentes de forças em relação a qualquer outro eixo.

A Equação 5-1 nos diz que se a força resultante que age sobre um corpo é nula, a aceleração do corpo $\vec{a} = 0$. Se o corpo está em repouso, permanece em repouso;

se está em movimento, continua a se mover com velocidade constante. Em tais casos, as forças que agem sobre o corpo se *compensam* e dizemos que o corpo está em *equilíbrio*. Frequentemente, dizemos que as forças se *cancelam*, mas o termo “cancelar” pode ser mal interpretado. Ele *não* significa que as forças deixaram de existir (cancelar forças não é como cancelar uma reserva em um restaurante). As forças continuam a agir sobre o corpo.

Em unidades do SI, a Eq. 5-1 nos diz que

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg})(1 \text{ m/s}^2) = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2. \quad (5-3)$$

Algumas unidades de força em outros sistemas de unidades aparecem na Tabela 5-1 e no Apêndice D.

Tabela 5-1

Unidades da Segunda Lei de Newton (Eqs. 5-1 e 5-2)

Sistema	Força	Massa	Aceleração
SI	newton (N)	quilograma (kg)	m/s^2
CGS ^a	dina	grama (g)	cm/s^2
Britânico ^b	libra (lb)	slug	ft/s^2

^a1 dina = 1 g · cm/s².

^b1 libra = 1 slug · ft/s².

Muitas vezes, para resolver problemas que envolvem a segunda lei de Newton, desenhamos um **diagrama de corpo livre** no qual o único corpo mostrado é aquele para o qual estamos somando as forças. Um esboço do próprio corpo é preferido por alguns professores, mas, para poupar espaço nestes capítulos, representaremos quase sempre o corpo por um ponto. Além disso, as forças que agem sobre o corpo serão representadas por setas com a origem no ponto. Um sistema de coordenadas é normalmente incluído e a aceleração do corpo é algumas vezes mostrada através de outra seta (acompanhada por um símbolo adequado para mostrar que se trata de uma aceleração).

Um **sistema** é formado por um ou mais corpos; qualquer força exercida sobre os corpos do sistema por corpos que não pertencem ao sistema é chamada de **força externa**. Se os corpos de um sistema estão rigidamente ligados uns aos outros, podemos tratar o sistema como um único corpo e a força resultante \vec{F}_{res} a que está submetido esse corpo é a soma vetorial das forças externas. (Não incluímos as **forças internas**, ou seja, as forças entre dois corpos pertencentes ao sistema.) Assim, por exemplo, uma locomotiva e um vagão formam um sistema. Se, digamos, um reboque puxa a locomotiva, a força exercida pelo reboque age sobre o sistema locomotiva-vagão. Como acontece no caso de um só corpo, podemos relacionar a força resultante externa que age sobre um sistema à aceleração do sistema através da segunda lei de Newton, $\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$, onde m é a massa total do sistema.



TESTE 2

A figura mostra duas forças horizontais atuando em um bloco apoiado em um piso sem atrito. Se uma terceira força horizontal \vec{F}_3 também age sobre o bloco, determine o módulo e a orientação de \vec{F}_3 se o bloco está (a) em repouso e (b) se movendo para a esquerda com uma velocidade constante de 5 m/s.



Exemplo

Forças alinhadas: disco metálico

Nas partes A, B e C da Fig. 5-3, uma ou duas forças agem sobre um disco metálico que se move sobre o gelo sem atrito ao longo do eixo x , em um movimento unidimensional. A massa do disco é $m = 0,20 \text{ kg}$. As forças \vec{F}_1 e \vec{F}_2 atuam ao longo do eixo x e têm módulos $F_1 = 4,0 \text{ N}$ e $F_2 = 2,0 \text{ N}$. A força \vec{F}_3 faz um ângulo $\theta = 30^\circ$ com o eixo x e tem um módulo $F_3 = 1,0 \text{ N}$. Qual é a aceleração do disco em cada situação?

IDEIA-CHAVE

Em todas as situações, podemos relacionar a aceleração \vec{a} à força resultante \vec{F}_{res} que age sobre o disco através da segunda lei de Newton, $\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$. Entretanto, como o movimento ocorre apenas ao longo do eixo x , podemos simplificar as situações escrevendo a segunda lei apenas para as componentes x :

$$F_{\text{res},x} = ma_x. \quad (5-4)$$

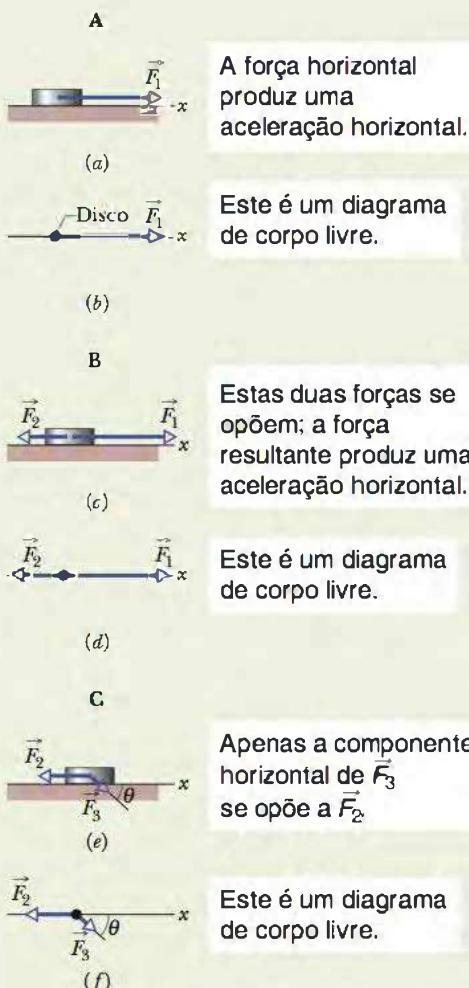


Figura 5-3 Em três situações, forças atuam sobre um disco que se move ao longo do eixo x . A figura mostra também diagramas de corpo livre.

Os diagramas de corpo livre para as três situações são também mostrados na Fig. 5-3, com o disco representado por um ponto.

Situação A Para a situação da Fig. 5-3b, em que existe apenas uma força horizontal, temos, de acordo com a Eq. 5-4,

$$F_1 = ma_x,$$

o que, para os dados do problema, nos dá

$$a_x = \frac{F_1}{m} = \frac{4,0 \text{ N}}{0,20 \text{ kg}} = 20 \text{ m/s}^2. \quad (\text{Resposta})$$

A resposta positiva indica que a aceleração ocorre no sentido positivo do eixo x .

Situação B Na Fig. 5-3d, duas forças horizontais agem sobre o disco: \vec{F}_1 , no sentido positivo do eixo x , e \vec{F}_2 , no sentido negativo. De acordo com a Eq. 5-4,

$$F_1 - F_2 = ma_x,$$

o que, para os dados do problema, nos dá

$$a_x = \frac{F_1 - F_2}{m} = \frac{4,0 \text{ N} - 2,0 \text{ N}}{0,20 \text{ kg}} = 10 \text{ m/s}^2.$$

(Resposta)

Assim, a força resultante acelera o disco no sentido positivo do eixo x .

Situação C Na Fig. 5-3f, não é a força \vec{F}_3 que tem a direção da aceleração do disco, mas sim a componente $F_{3,x}$. (A força \vec{F}_3 não está alinhada com a força \vec{F}_2 nem com a direção do movimento*.) Assim, a Eq. 5-4 assume a forma

$$F_{3,x} - F_2 = ma_x. \quad (5-5)$$

De acordo com a figura, $F_{3,x} = F_3 \cos \theta$. Explicitando a aceleração e substituindo $F_{3,x}$ por seu valor, temos:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{F_{3,x} - F_2}{m} = \frac{F_3 \cos \theta - F_2}{m} \\ &= \frac{(1,0 \text{ N})(\cos 30^\circ) - 2,0 \text{ N}}{0,20 \text{ kg}} = -5,7 \text{ m/s}^2. \end{aligned}$$

(Resposta)

Assim, a força resultante acelera o disco no sentido negativo do eixo x .

* O disco não é acelerado na direção y porque a componente y da força \vec{F}_3 é equilibrada pela força normal, que será discutida na Seção 5-7. (N.T.)

Exemplo

Forças não alinhadas: lata de biscoitos

Na vista superior da Fig. 5-4a, uma lata de biscoitos de 2,0 kg é acelerada a $3,0 \text{ m/s}^2$, na orientação definida por \vec{a} , em uma superfície horizontal sem atrito. A aceleração é causada por três forças horizontais, das quais apenas duas são mostradas: \vec{F}_1 , de módulo 10 N, e \vec{F}_2 , de módulo 20 N. Qual é a terceira força, \vec{F}_3 , em termos dos vetores unitários e na notação módulo-ângulo?

IDEIA-CHAVE

A força resultante \vec{F}_{res} que age sobre a lata é a soma das três forças e está relacionada à aceleração \vec{a} pela segunda lei de Newton ($\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$). Assim,

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = m\vec{a}, \quad (5-6)$$

o que nos dá

$$\vec{F}_3 = m\vec{a} - \vec{F}_1 - \vec{F}_2. \quad (5-7)$$

Cálculos Como as forças não estão alinhadas, *não podemos* determinar \vec{F}_3 simplesmente substituindo os módulos das forças no lado direito da Eq. 5-7. O correto é somar vetorialmente $m\vec{a}$, $-\vec{F}_1$ e $-\vec{F}_2$, como mostra a Fig. 5-4b. A soma poderia ser feita com o auxílio de uma calculadora, já que conhecemos tanto o módulo como o ângulo dos três vetores. Entretanto, optamos por calcular o lado direito da Eq. 5-7 em termos das componentes, primeiro para o eixo x e depois para o eixo y .

Componentes x Para o eixo x , temos:

$$\begin{aligned} F_{3,x} &= ma_x - F_{1,x} - F_{2,x} \\ &= m(a \cos 50^\circ) - F_1 \cos(-150^\circ) - F_2 \cos 90^\circ. \end{aligned}$$

Substituindo os valores conhecidos, obtemos

$$\begin{aligned} F_{3,x} &= (2,0 \text{ kg})(3,0 \text{ m/s}^2) \cos 50^\circ - (10 \text{ N}) \cos(-150^\circ) \\ &\quad - (20 \text{ N}) \cos 90^\circ \\ &= 12,5 \text{ N}. \end{aligned}$$

Componentes y Para o eixo y , temos:

$$\begin{aligned} F_{3,y} &= ma_y - F_{1,y} - F_{2,y} \\ &= m(a \sin 50^\circ) - F_1 \sin(-150^\circ) - F_2 \sin 90^\circ \\ &= (2,0 \text{ kg})(3,0 \text{ m/s}^2) \sin 50^\circ - (10 \text{ N}) \sin(-150^\circ) \\ &\quad - (20 \text{ N}) \sin 90^\circ \\ &= -10,4 \text{ N}. \end{aligned}$$

Vetor Em termos dos vetores unitários, temos:

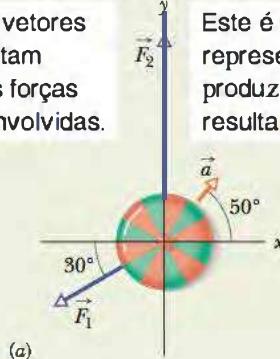
$$\begin{aligned} \vec{F}_3 &= F_{3,x}\hat{i} + F_{3,y}\hat{j} = (12,5 \text{ N})\hat{i} - (10,4 \text{ N})\hat{j} \\ &\approx (13 \text{ N})\hat{i} - (10 \text{ N})\hat{j}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Podemos agora usar uma calculadora para determinar o módulo e o ângulo de \vec{F}_3 . Também podemos usar a Eq. 3-6 para obter o módulo e o ângulo (em relação ao semieixo x positivo):

$$F_3 = \sqrt{F_{3,x}^2 + F_{3,y}^2} = 16 \text{ N}$$

$$\text{e } \theta = \tan^{-1} \frac{F_{3,y}}{F_{3,x}} = -40^\circ. \quad (\text{Resposta})$$

Estes são os vetores que representam duas das três forças horizontais envolvidas.



(a)

Este é o vetor que representa a aceleração produzida pela força resultante.

Desenhamos o produto da massa pela aceleração como um vetor.



(b)

Podemos então somar os três vetores para obter o vetor que representa a terceira força.

Figura 5-4 (a) Vista superior de duas das três forças que agem sobre uma lata de biscoitos, produzindo uma aceleração \vec{a} . \vec{F}_3 não é mostrada. (b) Um arranjo de vetores $m\vec{a}$, $-\vec{F}_1$ e $-\vec{F}_2$ para determinar a força \vec{F}_3 .

5-7 Algumas Forças Especiais

Força Gravitacional

A **força gravitacional** \vec{F}_g exercida sobre um corpo é um tipo especial de atração que um segundo corpo exerce sobre o primeiro. Nestes capítulos iniciais, não discutimos a natureza dessa força e consideramos apenas situações nas quais o segundo corpo é a Terra. Assim, quando falamos da força gravitacional \vec{F}_g que age sobre um corpo, estamos nos referindo à força que o atrai na direção do centro da Terra, ou seja, verticalmente para baixo. Vamos supor que o solo é um referencial inercial.

Considere um corpo de massa m em queda livre, submetido, portanto, a uma aceleração de módulo g . Nesse caso, se desprezarmos os efeitos do ar, a única força que age sobre o corpo é a força gravitacional \vec{F}_g . Podemos relacionar essa força à aceleração correspondente através da segunda lei de Newton, $\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$. Colocamos um eixo y vertical ao longo da trajetória do corpo, com o sentido positivo para cima. Para este eixo, a segunda lei de Newton pode ser escrita na forma $F_{\text{res},y} = ma_y$, que, em nossa situação, se torna

$$-F_g = m(-g)$$

ou

$$\vec{F}_g = mg. \quad (5-8)$$

Em palavras, o módulo da força gravitacional é igual ao produto mg .

Esta mesma força gravitacional, com o mesmo módulo, atua sobre o corpo mesmo quando não está em queda livre, mas se encontra, por exemplo, em repouso sobre uma mesa de sinuca ou movendo-se sobre a mesa. (Para que a força gravitacional desaparecesse, a Terra teria que desaparecer.)

Podemos escrever a segunda lei de Newton para a força gravitacional nas seguintes formas vetoriais:

$$\vec{F}_g = -F_g \hat{j} = -mg \hat{j} = m\vec{g}, \quad (5-9)$$

onde \hat{j} é o vetor unitário que aponta para cima ao longo do eixo y , perpendicularmente ao solo, e \vec{g} é a aceleração de queda livre (escrita como um vetor), dirigida para baixo.

Peso

O **peso** P de um corpo é o módulo da força necessária para impedir que o corpo caia livremente, medida em relação ao solo. Assim, por exemplo, para manter uma bola em repouso em sua mão enquanto você está parado de pé, você deve aplicar uma força para cima para equilibrar a força gravitacional que a Terra exerce sobre a bola. Suponha que o módulo da força gravitacional é 2,0 N. Nesse caso, o módulo da força para cima deve ser 2,0 N e, portanto, o *peso* P da bola é 2,0 N. Também dizemos que a bola *pesa* 2,0 N.

Uma bola com um peso de 3,0 N exigiria uma força maior (3,0 N) para permanecer em equilíbrio. A razão é que a força gravitacional a ser equilibrada tem um módulo maior (3,0 N). Dizemos que esta segunda bola é *mais pesada* que a primeira.

Vamos generalizar a situação. Considere um corpo que tem uma aceleração \vec{a} nula em relação ao solo, considerado mais uma vez como referencial inercial. Duas forças atuam sobre o corpo: uma força gravitacional \vec{F}_g , dirigida para baixo, e uma força para cima, de módulo P , que a equilibra. Podemos escrever a segunda lei de Newton para um eixo y vertical, com o sentido positivo para cima, na forma

$$F_{\text{res},y} = ma_y.$$

Em nossa situação, esta equação se torna

$$P - F_g = m(0) \quad (5-10)$$

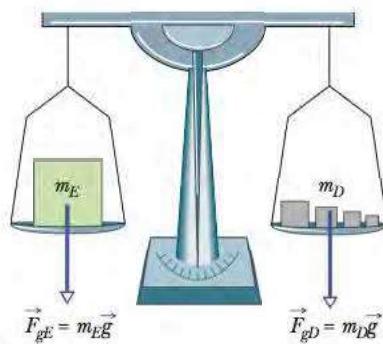


Figura 5-5 Uma balança de braços iguais. Quando a balança está equilibrada, a força gravitacional \vec{F}_{gE} a que está submetido o corpo que se deseja pesar (no prato da esquerda) e a força gravitacional total \vec{F}_{gD} a que estão submetidas as massas de referência (no prato da direita) são iguais. Assim, a massa m_E do corpo que está sendo pesado é igual à massa total m_D das massas de referência.

$$\text{OU} \quad P = F_g \quad (\text{peso, com o solo como referencial inercial}). \quad (5-11)$$

De acordo com a Eq. 5-11 (supondo que o solo é um referencial inercial),

O peso P de um corpo é igual ao módulo F_g da força gravitacional que age sobre o corpo.

Substituindo F_g por mg , obtemos a equação

$$P = mg \quad (\text{peso}). \quad (5-12)$$

que relaciona o peso à massa do corpo.

Pesar um corpo significa medir o peso do corpo. Uma forma de fazer isso é colocar o corpo em um dos pratos de uma balança de braços iguais (Fig. 5-5) e colocar corpos de referência (cujas massas sejam conhecidas) no outro prato até que se estabeleça o equilíbrio, ou seja, até que as forças gravitacionais dos dois lados sejam iguais. Como, nessa situação, as massas nos dois pratos são iguais, ficamos conhecendo a massa do corpo. Se conhecemos o valor de g no local onde está situada a balança, também podemos calcular o peso do corpo com o auxílio da Eq. 5-12.

Também podemos pesar um corpo em uma balança de mola (Fig. 5-6). O corpo distende uma mola, movendo um ponteiro ao longo de uma escala que foi calibrada e marcada em unidades de massa ou de força. (Quase todas as balanças de banheiro são deste tipo.) Se a escala estiver em unidades de massa, fornecerá valores precisos apenas nos lugares onde o valor de g for o mesmo da localidade onde a balança foi calibrada.

Para que o peso de um corpo seja medido corretamente, não deve possuir uma aceleração vertical. Assim, por exemplo, se você se pesar no banheiro de casa ou a bordo de um trem em movimento, o resultado será o mesmo. Caso, porém, repita a medição em um elevador acelerado, obterá uma leitura diferente por causa da aceleração. Um peso medido desta forma é chamado de *peso aparente*.

Atenção: o peso de um corpo não é a mesma coisa que a massa. O peso é o módulo de uma força e está relacionado à massa através da Eq. 5-12. Se você mover um corpo para um local onde o valor de g é diferente, a massa do corpo (uma propriedade intrínseca) continuará a mesma, mas o peso mudará. Por exemplo: o peso de uma bola de boliche de massa igual a 7,2 kg é 71 N na Terra, mas apenas 12 N na Lua. Isso se deve ao fato de que, enquanto a massa é a mesma na Terra e na Lua, a aceleração de queda livre na Lua é apenas $1,6 \text{ m/s}^2$, muito menor, portanto, que a aceleração de queda livre na Terra, que é da ordem de $9,8 \text{ m/s}^2$.

Força Normal

Se você fica em pé em colchão, a Terra o puxa para baixo, mas você permanece em repouso. Isso acontece porque o colchão se deforma sob o seu peso e empurra você para cima. Da mesma forma, se você está sobre um piso, ele se deforma (ainda que imperceptivelmente) e o empurra para cima. Mesmo um piso de concreto aparentemente rígido faz o mesmo (se não estiver apoiado diretamente no solo, um número suficientemente grande de pessoas sobre o mesmo pode quebrá-lo).

O empurrão exercido pelo colchão ou pelo piso é uma **força normal** \vec{F}_N . O nome vem do termo matemático *normal*, que significa perpendicular. A força que o piso exerce sobre você é perpendicular ao piso.

Quando um corpo exerce uma força sobre uma superfície, a superfície (ainda que aparentemente rígida) se deforma e empurra o corpo com uma força normal \vec{F}_N que é perpendicular à superfície.

A Figura 5-7a mostra um exemplo. Um bloco de massa m pressiona uma mesa para baixo, deformando-a por causa da força gravitacional \vec{F}_g a que o bloco está sujeito.

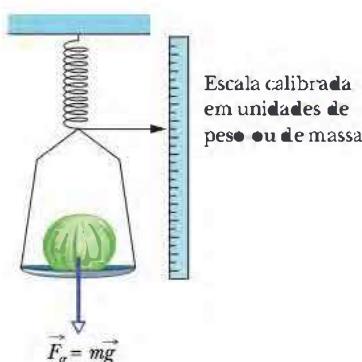


Figura 5-6 Uma balança de mola. A leitura é proporcional ao peso do objeto colocado no prato e a escala fornece o valor do peso se estiver calibrada em unidades de força. Se, em vez disso, estiver calibrada em unidades de massa, a leitura será igual ao peso do objeto apenas se o valor de g no lugar onde a balança está sendo usada for igual ao valor de g no lugar onde a balança foi calibrada.

A força normal é a força que a mesa exerce sobre o bloco.

A força gravitacional é a força que a Terra exerce sobre o bloco.

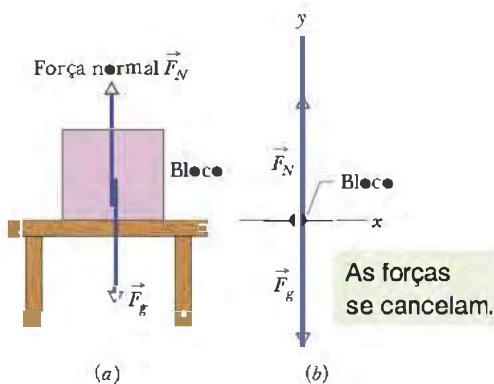


Figura 5-7 (a) Um bloco que repousa sobre uma mesa experimenta uma força normal \vec{F}_N perpendicular à superfície da mesa. (b) Diagrama de corpo livre do bloco.

to. A mesa empurra o bloco para cima com uma força normal \vec{F}_N . A Fig. 5-7b mostra o diagrama de corpo livre do bloco. As forças \vec{F}_g e \vec{F}_N são as únicas forças que atuam sobre o bloco e ambas são verticais. Assim, a segunda lei de Newton para o bloco, tomando um eixo y com o sentido positivo para cima ($F_{\text{res},y} = ma_y$), assume a forma

$$F_N - F_g = ma_y.$$

Substituindo F_g por mg (Eq. 5-8), obtemos

$$F_N - mg = ma_y.$$

O módulo da força normal é, portanto,

$$F_N = mg + ma_y = m(g + a_y) \quad (5-13)$$

para qualquer aceleração vertical a_y da mesa e do bloco (que poderiam estar, por exemplo, em um elevador acelerado). Se a mesa e o bloco não estão acelerados em relação ao solo, $a_y = 0$ e a Eq. 5-13 nos dá

$$F_N = mg. \quad (5-14)$$



TESTE 3

Na Fig. 5-7, o módulo da força normal \vec{F}_N é maior, menor ou igual a mg se o bloco e a mesa estão em um elevador que se move para cima (a) com velocidade constante; (b) com velocidade crescente?

Atrito

Quando empurramos ou tentamos empurrar um corpo sobre uma superfície, a interação dos átomos do corpo com os átomos da superfície faz com que haja uma resistência ao movimento. (Essa interação será discutida no próximo capítulo.) A resistência é considerada como uma única força \vec{f} , que recebe o nome de **força de atrito** ou simplesmente **atrito**. Essa força é paralela à superfície e aponta no sentido oposto ao do movimento ou tendência ao movimento (Fig. 5-8). Em algumas situações, para simplificar os cálculos, desprezamos as forças de atrito.

Tração

Quando uma corda (ou um fio, cabo ou outro objeto do mesmo tipo) é presa a um corpo e esticada, aplica ao corpo uma força \vec{T} orientada ao longo da corda (Fig. 5-9a). Essa força é chamada de **força de tração** porque a corda está sendo tracionada (puxada). A **tensão da corda** é o módulo T da força exercida sobre o corpo. Assim, por exemplo, se a força exercida pela corda sobre o corpo tem um módulo $T = 50 \text{ N}$, a tensão da corda é 50 N .

Uma corda é frequentemente considerada *sem massa* (o que significa que a massa da corda é desprezível em comparação com a massa do corpo ao qual está presa) e

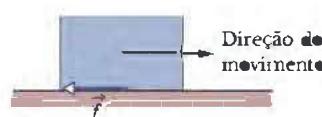
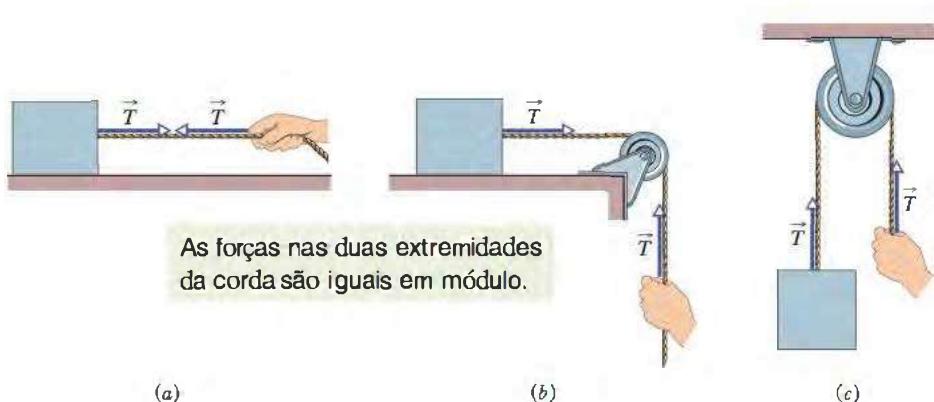


Figura 5-8 Uma força de atrito \vec{f} se opõe ao movimento de um corpo sobre uma superfície.

Figura 5-9 (a) A corda esticada está sob tensão. Se a massa da corda é desprezível, a corda puxa o corpo e a mão com uma força \vec{T} , mesmo que passe por uma polia sem massa e sem atrito, como em (b) e (c).



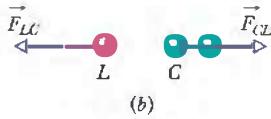
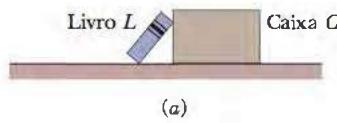
inextensível (o que significa que o comprimento da corda não muda quando é submetida a uma força de tração). Nessas circunstâncias, a corda existe apenas como uma ligação entre dois corpos: exerce sobre os dois corpos forças de mesmo módulo T , mesmo que os dois corpos e a corda estejam acelerando e mesmo que a corda passe por uma polia *sem massa e sem atrito* (Figs. 5-9b e c), ou seja, uma polia cuja massa é desprezível em comparação com as massas dos corpos e cujo atrito no eixo de rotação pode ser desprezado. Se a corda dá meia volta em torno da polia, como na Fig. 5-9c, a força resultante da corda sobre a polia é $2T$.

 TESTE 4

O corpo suspenso da Fig. 5-9c pesa 75 N. A tensão T é igual, maior ou menor que 75 N quando o corpo se move para cima (a) com velocidade constante, (b) com velocidade crescente e (c) com velocidade decrescente?

5-8 A Terceira Lei de Newton

Dizemos que dois corpos *interagem* quando empurram ou puxam um ao outro, ou seja, quando cada corpo exerce uma força sobre o outro. Suponha, por exemplo, que você apoie um livro L em uma caixa C (Fig. 5-10a). Nesse caso, o livro e a caixa interagem: a caixa exerce uma força horizontal \vec{F}_{C_L} sobre o livro e o livro exerce uma força horizontal \vec{F}_{L_C} sobre a caixa. Este par de forças é mostrado na Fig. 5-10b. A terceira lei de Newton afirma o seguinte:



A força que L exerce sobre C tem o mesmo módulo que a força que C exerce sobre L .

Figura 5-10 (a) O livro L está apoiado na caixa C . (b) As forças \vec{F}_{LC} (força da caixa sobre o livro) e \vec{F}_{CL} (força do livro sobre a caixa) têm o mesmo módulo e sentidos opostos.

Terceira Lei de Newton Quando dois corpos interagem, as forças que cada corpo exerce sobre o outro são iguais em módulo e têm sentidos opostos.

No caso do livro e da caixa, podemos escrever esta lei como a relação escalar

$$F_{\nu c} = F_{\alpha} \quad (\text{módulos iguais})$$

ou como a relação vetorial

$$\vec{F}_{LC} = -\vec{F}_{CL} \quad (\text{módulos iguais e sentidos opostos}) \quad (5-15)$$

onde o sinal negativo significa que as duas forças têm sentidos opostos. Podemos chamar as forças entre dois corpos que interagem de **par de forças da terceira lei**. Sempre que dois corpos interagem, um par de forças da terceira lei está presente. O livro e a caixa da Fig. 5-10a estão em repouso, mas a terceira lei seria válida mesmo que estivessem em movimento uniforme ou acelerado.

Como outro exemplo, vamos examinar os pares de forças da terceira lei que existem no sistema da Fig. 5-11a, constituído por uma laranja, uma mesa e a Terra.

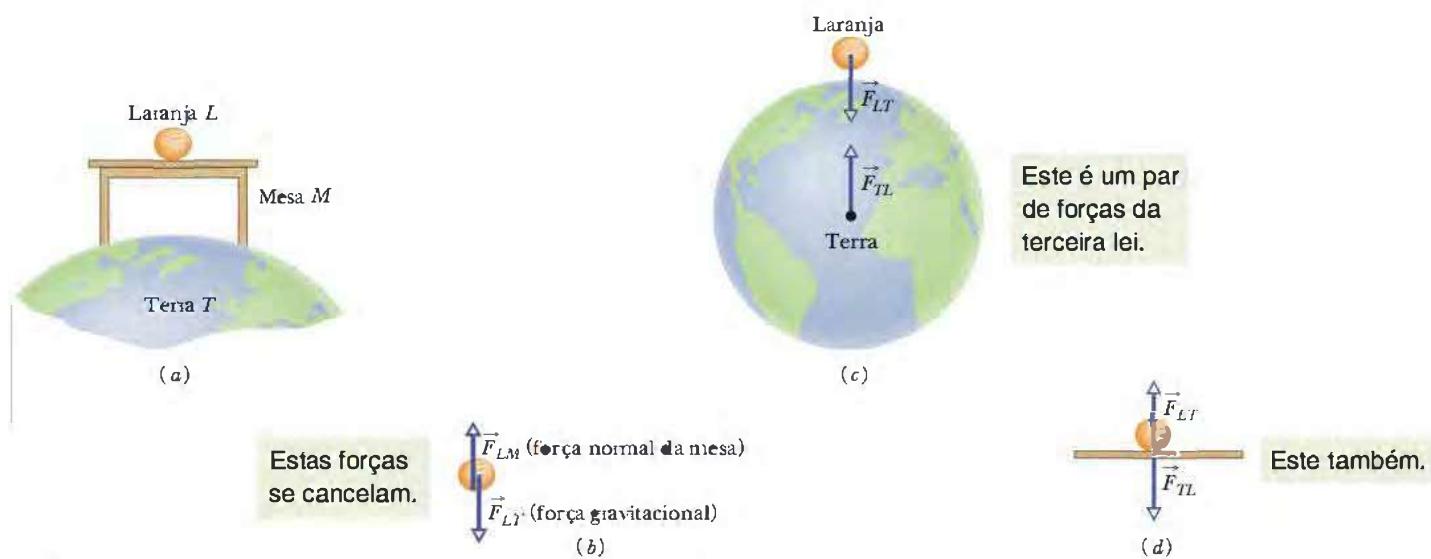


Figura 5-11 (a) Uma laranja em repouso sobre uma mesa na superfície da Terra. (b) As forças que agem *sobre a laranja* são \vec{F}_{LM} e \vec{F}_{LT} . (c) Par de forças da terceira lei para a interação abóbora-Terra. (d) Par de forças da terceira lei para a interação abóbora-mesa.

A laranja interage com a mesa e esta com a Terra (desta vez, existem **três** corpos cujas interações devemos estudar).

Vamos inicialmente nos concentrar nas forças que agem sobre a laranja (Fig. 5-11b). A força \vec{F}_{LM} é a força normal que a mesa exerce sobre a laranja e a força \vec{F}_{LT} é a força gravitacional que a Terra exerce sobre a laranja. \vec{F}_{LM} e \vec{F}_{LT} formam um par de forças da terceira lei? Não, pois são forças que atuam sobre um mesmo corpo, a laranja, e não sobre dois corpos que interagem.

Para encontrar um par da terceira lei, precisamos nos concentrar, não na laranja, mas na interação entre a laranja e *outro* corpo. Na interação laranja-Terra (Fig. 5-11c), a Terra *atraí* a laranja com uma força gravitacional \vec{F}_{LT} e a laranja *atraí* a Terra com uma força gravitacional \vec{F}_{TL} . Essas forças formam um par de forças da terceira lei? Sim, porque as forças atuam sobre dois corpos que interagem e a força a que um está submetido é causada pelo outro. Assim, de acordo com a terceira lei de Newton,

$$\vec{F}_{LT} = -\vec{F}_{TL} \quad (\text{interação laranja-Terra})$$

Na interação laranja-mesa, a força da mesa sobre a laranja é \vec{F}_{LM} e a força da laranja sobre a mesa é \vec{F}_{ML} (Fig. 5-11d). Essas forças também formam um par de forças da terceira lei e, portanto,

$$\vec{F}_{LM} = -\vec{F}_{ML} \quad (\text{interação laranja-mesa})$$

TESTE 5

- Suponha que a laranja e a mesa da Fig. 5-11 estão em um elevador que comece a acelerar para cima. (a) Os módulos de \vec{F}_{ML} e \vec{F}_{LM} aumentam, diminuem ou permanecem os mesmos? (b) Essas duas forças continuam a ser iguais em módulo, com sentidos opostos? (c) Os módulos de \vec{F}_{LT} e \vec{F}_{TL} aumentam, diminuem, ou permanecem os mesmos? (d) Essas duas forças continuam a ser iguais em módulo, com sentidos opostos?

5-9 Aplicando as Leis de Newton

O resto deste capítulo é composto por exemplos. O leitor deve examiná-los atentamente, observando os métodos usados para resolver cada problema. Especialmente importante é saber traduzir uma dada situação em um diagrama de corpo livre com eixos adequados, para que as leis de Newton possam ser aplicadas.

Exemplo

Bloco deslizante e bloco pendente

A Fig. 5-12 mostra um bloco *D* (o *bloco deslizante*) de massa $M = 3,3$ kg. O bloco está livre para se mover ao longo de uma superfície horizontal sem atrito e está ligado, por uma corda que passa por uma polia sem atrito, a um segundo bloco *P* (o *bloco pendente*), de massa $m = 2,1$ kg. As massas da corda e da polia podem ser desprezadas em comparação com a massa dos blocos. Enquanto o bloco pendente *P* desce, o bloco deslizante *D* acelera para a direita. Determine (a) a aceleração do bloco *D*, (b) a aceleração do bloco *P* e (c) a tensão na corda.

P De que trata este problema?

Foram dados dois corpos, o bloco deslizante e o bloco pendente, mas também é preciso levar em conta a Terra, que atua sobre os dois corpos. (Se não fosse a Terra, os blocos não se moveriam.) Como mostra a Fig. 5-13, cinco forças agem sobre os blocos:

1. A corda puxa o bloco *D* para a direita com uma força de módulo T .
2. A corda puxa o bloco *P* para cima com uma força cujo módulo também é T . Esta força para cima evita que o bloco caia livremente.
3. A Terra puxa o bloco *D* para baixo com uma força gravitacional \vec{F}_{gD} , cujo módulo é Mg .
4. A Terra puxa o bloco *P* para baixo com uma força gravitacional \vec{F}_{gp} , cujo módulo é mg .
5. A mesa empurra o bloco *D* para cima com uma força normal \vec{F}_N .

Existe outra coisa digna de nota. Como estamos supondo que a corda é inextensível, se o bloco *P* desce 1 mm em um certo intervalo de tempo, o bloco *D* se move 1 mm para a direita no mesmo intervalo. Isso significa que os blocos se movem em conjunto e as acelerações dos dois blocos têm o mesmo módulo a .

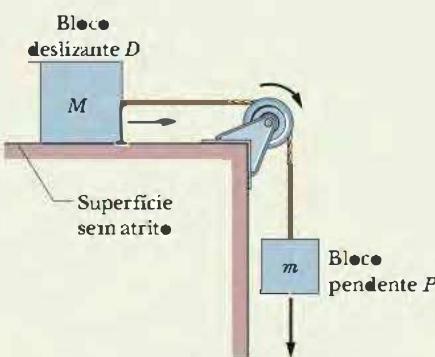


Figura 5-12 Um bloco *D* de massa M está conectado a um bloco *P* de massa m por uma corda que passa por uma polia.

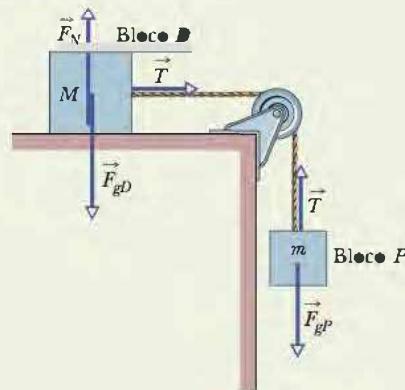


Figura 5-13 As forças que agem sobre os dois blocos da Fig. 5-12.

P Como classificar esse problema? Ele sugere alguma lei da física em particular?

Sim. O fato de que as grandezas envolvidas são forças, massas e acelerações sugere a segunda lei de Newton do movimento, $\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$. Essa é a nossa **ideia-chave** inicial.

P Se eu aplicar a segunda lei de Newton a esse problema, a que corpo devo aplicá-la?

Estamos lidando com o movimento de dois corpos, o bloco deslizante e o bloco pendente. Embora se trate de corpos extensos (não pontuais), podemos tratá-los como partículas porque todas as partes de cada bloco se movem exatamente da mesma forma. Uma segunda **ideia-chave** é aplicar a segunda lei de Newton separadamente a cada bloco.

P E a polia?

A polia não pode ser tratada como uma partícula porque diferentes partes da polia se movem de modo diferente. Quando discutirmos as rotações, examinaremos com detalhes o caso das polias. No momento, evitamos discutir o comportamento da polia supondo que sua massa pode ser desprezada em comparação com as massas dos dois blocos; a única função da polia é mudar a orientação da corda.

P Está certo, mas como vou aplicar a equação $\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$ ao bloco deslizante?

Represente o bloco *D* como uma partícula de massa M e desenhe todas as forças que atuam sobre ele, como na Fig. 5-14a. Este é o diagrama de corpo livre do bloco. Em seguida, desenhe um conjunto de eixos. O mais natural é desenhar o eixo x paralelo à mesa, apontando para a direita, no sentido do movimento do bloco *D*.

P Obrigado, mas você ainda não me disse como vou aplicar a equação $\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$ ao bloco deslizante; tudo que fez foi explicar como se desenha um diagrama de corpo livre.

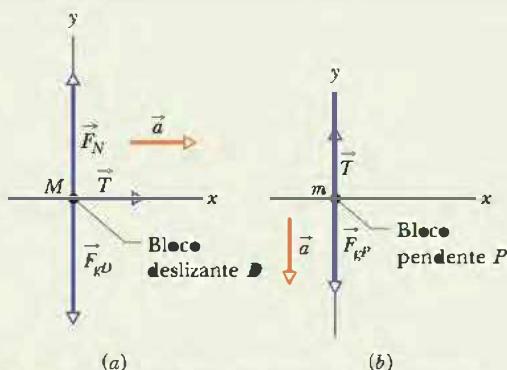


Figura 5-14 (a) Diagrama de corpo livre do bloco D da Fig. 5-12. (b) Diagrama de corpo livre do bloco P da Fig. 5-12.

Tem razão. Aqui está a terceira **ideia-chave**: a equação $\vec{F}_{res} = M\vec{a}$ é uma equação vetorial e, portanto, equivale a três equações algébricas, uma para cada componente:

$$F_{res,x} = Ma_x, \quad F_{res,y} = Ma_y, \quad F_{res,z} = Ma_z \quad (5-16)$$

onde $F_{res,x}$, $F_{res,y}$ e $F_{res,z}$ são as componentes da força resultante em relação aos três eixos. Podemos aplicar cada uma dessas equações à direção correspondente. Como o bloco D não possui aceleração vertical, $F_{res,y} = Ma_y$ se torna

$$F_N = F_{gD} = 0 \text{ ou } F_N = F_{gD} \quad (5-17)$$

Assim, na direção y, o módulo da força normal é igual ao módulo da força gravitacional.

Nenhuma força atua na direção z, que é perpendicular ao papel.

Na direção x existe apenas uma componente de força, que é T . Assim, a equação $F_{res,x} = Ma_x$ se torna

$$T = Ma_x. \quad (5-18)$$

Como essa equação contém duas incógnitas, T e a , ainda não podemos resolvê-la. Lembre-se, porém, de que ainda não dissemos nada a respeito do bloco pendente.

P De acordo. Como vou aplicar a equação $\vec{F}_{res} = m\vec{a}$ ao bloco pendente?

Do mesmo modo como aplicou ao bloco D: desenhe um diagrama de corpo livre para o bloco P, como na Fig. 5-14b. Em seguida, aplique a equação $\vec{F}_{res} = m\vec{a}$ na forma de componentes. Desta vez, como a aceleração é ao longo do eixo y, use a parte y da Eq. 5-16 ($F_{res,y} = ma_y$) para escrever

$$T - F_{gP} = ma_y. \quad (5-19)$$

Podemos agora substituir F_{gP} por mg e a_y por $-a$ (o valor é negativo porque o bloco P sofre uma aceleração no sentido negativo do eixo y). O resultado é

$$T - mg = -ma. \quad (5-20)$$

Observe que as Eqs. 5-18 e 5-20 formam um sistema de duas equações com duas incógnitas, T e a . Subtraindo essas equações, eliminamos T . Explicitando a , obtemos:

$$a = \frac{m}{M+m} g. \quad (5-21)$$

Substituindo este resultado na Eq. 5-18, temos:

$$T = \frac{Mm}{M+m} g. \quad (5-22)$$

Substituindo os valores numéricos, temos:

$$\begin{aligned} a &= \frac{m}{M+m} g = \frac{2,1 \text{ kg}}{3,3 \text{ kg} + 2,1 \text{ kg}} (9,8 \text{ m/s}^2) \\ &= 3,8 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

$$\begin{aligned} \text{e} \quad T &= \frac{Mm}{M+m} g = \frac{(3,3 \text{ kg})(2,1 \text{ kg})}{3,3 \text{ kg} + 2,1 \text{ kg}} (9,8 \text{ m/s}^2) \\ &= 13 \text{ N.} \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

P O problema agora está resolvido, certo?

Essa é uma pergunta razoável, mas o problema não pode ser considerado resolvido até que você examine os resultados para ver se fazem sentido. (Se você obtivesse esses resultados no trabalho, não faria questão de conferi-los antes de entregá-los ao chefe?)

Examine primeiro a Eq. 5-21. Observe que está dimensionalmente correta e que a aceleração a será sempre menor que g . Isto faz sentido, pois o bloco pendente não está em queda livre; a corda o puxa para cima.

Examine em seguida a Eq. 5-22, que pode ser escrita na forma

$$T = \frac{M}{M+m} mg. \quad (5-23)$$

Nessa forma, fica mais fácil ver que esta equação também está dimensionalmente correta, já que tanto T quanto mg têm dimensões de força. A Eq. 5-23 também mostra que a tensão na corda é sempre menor que mg e, portanto, é sempre menor que a força gravitacional a que está submetido o bloco pendente. Isso é razoável; se T fosse maior que mg , o bloco pendente sofreria uma aceleração para cima.

Podemos também verificar se os resultados estão corretos estudando casos especiais para os quais sabemos de antemão qual é a resposta. Um caso simples é aquele em que $g = 0$, como se o experimento fosse realizado no espaço sideral. Sabemos que, nesse caso, os blocos ficariam imóveis, não existiriam forças nas extremidades da corda e, portanto, não haveria tensão na corda. As fórmulas preveem isso? Sim. Fazendo $g = 0$ nas Eqs. 5-21 e 5-22, encontramos $a = 0$ e $T = 0$. Dois outros casos especiais fáceis de examinar são $M = 0$ e $m \rightarrow \infty$.

Exemplo

Corda, bloco e plano inclinado

Na Fig. 5-15a, uma corda puxa para cima uma caixa de biscoitos ao longo de um plano inclinado sem atrito cujo ângulo é $\theta = 30^\circ$. A massa da caixa é $m = 5,00 \text{ kg}$ e o módulo da força exercida pela corda é $T = 25,0 \text{ N}$. Qual é a componente a da aceleração da caixa na direção do plano inclinado?

IDEIA-CHAVE

De acordo com a segunda lei de Newton (Eq. 5-1), a aceleração na direção do plano inclinado depende apenas das componentes das forças paralelas ao plano (não depende das componentes perpendiculares ao plano).

Cálculo Por conveniência, desenhamos o sistema de coordenadas e o diagrama de corpo livre da Fig. 5-15b. O sentido positivo do eixo x é para cima, paralelamente ao plano. A força \vec{T} exercida pela corda é dirigida para cima, paralelamente ao plano, e tem um módulo $T = 25,0 \text{ N}$. A força gravitacional \vec{F}_g é vertical, para baixo, e tem um módulo $mg = (5,00 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2) = 49,0 \text{ N}$. A componente

dessa força paralela ao plano é dirigida para baixo e tem um módulo $mg \sin \theta$, como mostra a Fig. 5-15g. (Para compreender por que essa função trigonométrica está envolvida, observe as Figs. 5-15c a 5-15h, nas quais são estabelecidas relações entre o ângulo dado e as componentes das forças.) Para indicar o sentido, escrevemos a componente como $-mg \sin \theta$. A força normal \vec{F}_N é perpendicular ao plano (Fig. 5-15i) e, portanto, não tem nenhuma influência sobre a aceleração da direção paralela ao plano.

De acordo com a Fig. 5-15h, podemos escrever a segunda lei de Newton ($F_{\text{res}} = ma$) para o movimento ao longo do eixo x na forma

$$T - mg \sin \theta = ma. \quad (5-24)$$

Substituindo os valores numéricos e explicitando a , obtemos

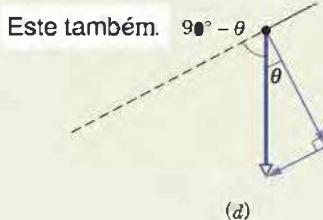
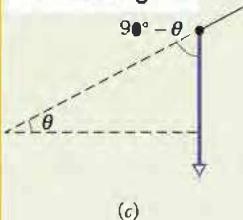
$$a = 0,100 \text{ m/s}^2, \quad (\text{Resposta})$$

onde o resultado positivo indica que a caixa se move para cima ao longo do plano.

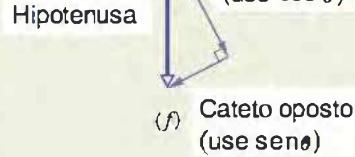
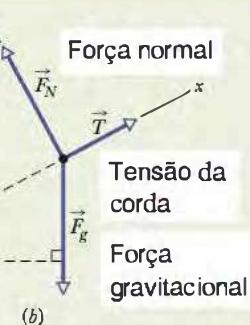
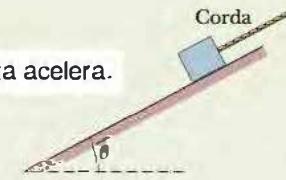


Figura 5-15 (a) Uma caixa sobe um plano inclinado, puxada por uma corda. (b) As três forças que agem sobre a caixa: a força da corda \vec{T} , a força gravitacional \vec{F}_g e a força normal \vec{F}_N . (c)-(i) As componentes de \vec{F}_g na direção do plano inclinado e na direção perpendicular.

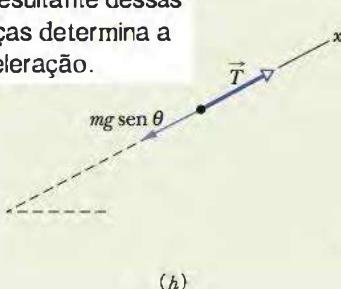
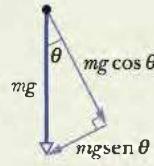
Este triângulo
é um retângulo.



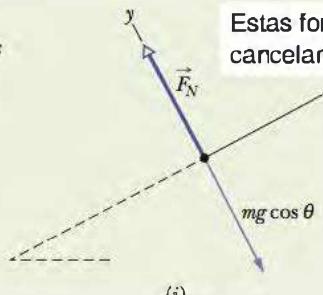
A caixa acelera.



A resultante dessas
forças determina a
aceleração.



Estas forças se
cancelam.



Exemplo

Força com um ângulo variável

A Fig. 5-16a mostra um arranjo no qual duas forças são aplicadas a um bloco de 4,00 kg em um piso sem atrito, mas apenas a força \vec{F}_1 está indicada. Essa força tem módulo fixo, mas o ângulo θ com o semieixo x positivo pode variar. A força \vec{F}_2 é horizontal e tem módulo constante. A Fig. 5-16b mostra a aceleração horizontal a_x do bloco em função de θ no intervalo $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Qual é o valor de a_x para $\theta = 180^\circ$?

IDEIAS-CHAVE

(1) A aceleração horizontal a_x depende da força horizontal resultante $F_{\text{res},x}$, dada pela segunda lei de Newton. (2) A força horizontal resultante é a soma das componentes horizontais das forças \vec{F}_1 e \vec{F}_2 .

Cálculos Como a força \vec{F}_2 é horizontal, a componente x é F_2 . A componente x de \vec{F}_1 é $F_1 \cos \theta$. Usando essas expressões e uma massa m de 4,00 kg, podemos escrever a segunda lei de Newton ($\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$) para o movimento ao longo do eixo x na forma

$$F_1 \cos \theta + F_2 = 4,00 a_x \quad (5-25)$$

Essa equação mostra que para $\theta = 90^\circ$, $F_1 \cos \theta$ é zero e $F_2 = 4,00 a_x$. De acordo com o gráfico, a aceleração correspondente é $0,50 \text{ m/s}^2$. Assim, $F_2 = 2,00 \text{ N}$ e o sentido de \vec{F}_2 é o sentido positivo do eixo x .

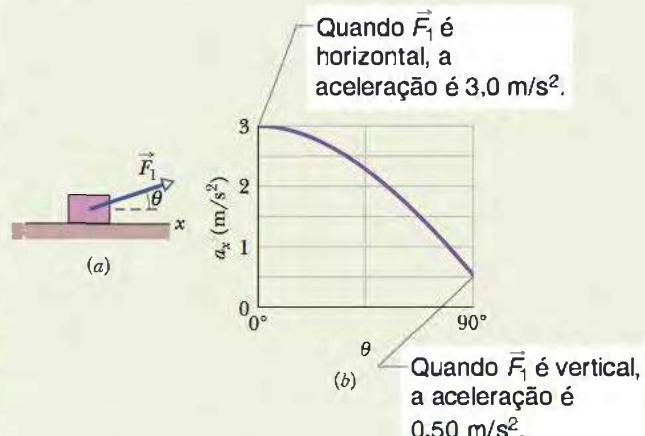


Figura 5-16 (a) Uma das duas forças aplicadas a um bloco. O ângulo θ pode variar. (b) Componente a_x da aceleração do bloco em função de θ .

Fazendo $\theta = 0^\circ$ na Eq. 5-25, obtemos:

$$F_1 \cos 0^\circ + 2,00 = 4,00 a_x \quad (5-26)$$

De acordo com o gráfico, a aceleração correspondente é $3,0 \text{ m/s}^2$. Substituindo este valor na Eq. 5-26, obtemos $F_1 = 10 \text{ N}$.

Fazendo $F_1 = 10 \text{ N}$, $F_2 = 2,00 \text{ N}$ e $\theta = 180^\circ$ na Eq. 5-25, temos:

$$a_x = -2,00 \text{ m/s}^2. \quad (\text{Resposta})$$

Exemplo

Forças em um elevador

Na Fig. 5-17a, um passageiro de massa $m = 72,2 \text{ kg}$ está de pé em uma balança no interior de um elevador. Estamos interessados na leitura da balança quando o elevador está parado e quando está se movendo para cima e para baixo.

(a) Escreva uma equação que expresse a leitura da balança em função da aceleração vertical do elevador.

IDEIAS-CHAVE

(1) A leitura é igual ao módulo da força normal \vec{F}_N que a balança exerce sobre o passageiro. Como mostra o diagrama de corpo livre da Fig. 5-17b, a única outra força que age sobre o passageiro é a força gravitacional \vec{F}_g . (b) Podemos relacionar as forças que agem sobre o passageiro à aceleração \vec{a} usando a segunda lei de Newton ($\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$). Lembre-se, porém, de que esta lei só se aplica aos referenciais inerciais. Um elevador acelerado não é um referencial inercial. Assim, escolhemos o solo como

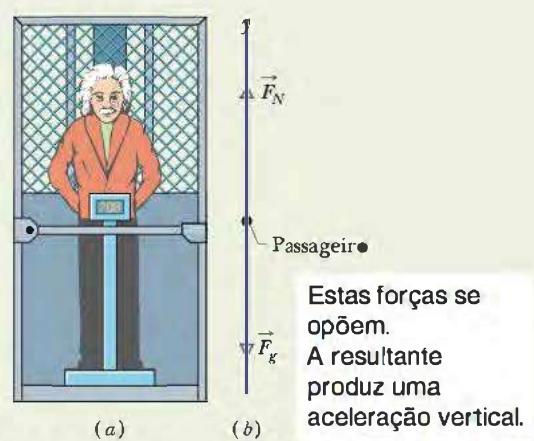


Figura 5-17 (a) Um passageiro de pé em uma balança que indica ou o peso ou o peso aparente. (b) O diagrama de corpo livre do passageiro, mostrando a força normal \vec{F}_N exercida pela balança e a força gravitacional \vec{F}_g .

referencial e analisamos todos os movimentos em relação a este referencial.

Cálculos Como as duas forças e a aceleração a que o passageiro está sujeito são verticais, na direção do eixo y da Fig. 5-17b, podemos usar a segunda lei de Newton para as componentes y ($F_{res,y} = ma_y$) e escrever

$$F_N - F_g = ma$$

ou

$$F_N = F_g + ma. \quad (5-27)$$

Isso significa que a leitura da balança, que é igual a F_N , depende da aceleração vertical. Substituindo F_g por mg , obtemos

$$F_N = m(g + a) \quad (\text{Resposta}) \quad (5-28)$$

para qualquer valor da aceleração a .

(b) Qual é a leitura da balança se o elevador está parado ou está se movendo para cima com uma velocidade constante de 0,50 m/s?

IDEIA-CHAVE

Para qualquer velocidade constante (zero ou diferente de zero), a aceleração do passageiro é zero.

Cálculo Substituindo esse e outros valores conhecidos na Eq. 5-28, obtemos

$$F_N = (72,2 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2 + 0) = 708 \text{ N.} \quad (\text{Resposta})$$

Esse é o peso do passageiro e é igual o módulo F_g da força gravitacional a que está submetido.

(c) Qual é a leitura da balança se o elevador sofre uma aceleração para cima de 3,20 m/s²? Qual é a leitura se o elevador sofre uma aceleração para baixo de 3,20 m/s²?

Cálculos Para $a = 3,20 \text{ m/s}^2$, a Eq. 5-28 nos dá

$$F_N = (72,2 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2 + 3,20 \text{ m/s}^2)$$

$$= 939 \text{ N,}$$

(Resposta)

e para $a = -3,20 \text{ m/s}^2$, temos

$$F_N = (72,2 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2 - 3,20 \text{ m/s}^2)$$

$$= 477 \text{ N} \quad (\text{Resposta})$$

Se a aceleração é para cima (ou seja, se a velocidade de subida do elevador está aumentando ou se a velocidade de descida está diminuindo), a leitura da balança é maior que o peso do passageiro. Essa leitura é uma medida do peso aparente, pois é realizada em um referencial não inercial. Se a aceleração é para baixo (ou seja, se a velocidade de subida do elevador está diminuindo ou a velocidade de descida está aumentando), a leitura da balança é menor que o peso do passageiro.

(d) Durante a aceleração para cima do item (c), qual é o módulo F_{res} da força resultante a que está submetido o passageiro e qual é o módulo a_{pel} da aceleração do passageiro no referencial do elevador? A equação $\vec{F}_{res} = m\vec{a}_{pel}$ é obedecida?

Cálculo O módulo F_g da força gravitacional a que está submetido o passageiro não depende da aceleração; assim, de acordo com o item (b), $F_g = 708 \text{ N}$. De acordo com o item (c), o módulo F_N da força normal a que está submetido o passageiro durante a aceleração para cima é o valor de 939 N indicado pela balança. Assim, a força resultante a que o passageiro está submetido é

$$F_{res} = F_N - F_g = 939 \text{ N} - 708 \text{ N} = 231 \text{ N.} \quad (\text{Resposta})$$

durante a aceleração para cima. Entretanto, a aceleração do passageiro em relação ao elevador, a_{pel} , é zero. Assim, no referencial não inercial do elevador acelerado, F_{res} não é igual a ma_{pel} e a segunda lei de Newton não é obedecida.

Exemplo

Aceleração de um bloco empurrado por outro bloco

Na Fig. 5-18a, uma força horizontal constante \vec{F}_{ap} de módulo 20 N é aplicada a um bloco A de massa $m_A = 4,0 \text{ kg}$, que empurra um bloco B de massa $m_B = 6,0 \text{ kg}$. O bloco desliza sobre uma superfície sem atrito ao longo de um eixo x.

(a) Qual é a aceleração dos blocos?

Erro Grave Como a força \vec{F}_{ap} é aplicada diretamente ao bloco A, usamos a segunda lei de Newton para relacionar essa força à aceleração \vec{a} do bloco A. Como o movimento é ao longo do eixo x, usamos a lei para as componentes x ($F_{res,x} = ma_x$), escrevendo

$$F_{ap} = m_A a.$$

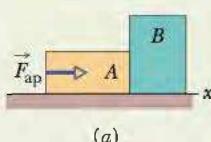
Esse raciocínio está errado porque \vec{F}_{ap} não é a única força horizontal a que o bloco A está sujeito; existe também a força \vec{F}_{AB} exercida pelo bloco B (Fig. 5-18b).

Solução Frustrada Vamos incluir a força \vec{F}_{AB} , escrevendo, novamente para o eixo x,

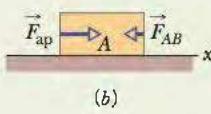
$$F_{ap} - F_{AB} = m_A a.$$

(Usamos o sinal negativo para indicar o sentido de \vec{F}_{AB} .) Como \vec{F}_{AB} é uma segunda incógnita, não podemos resolver esta equação para determinar o valor de a .

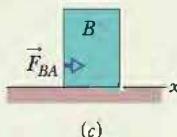
Solução Correta Por causa do sentido de aplicação da força \vec{F}_{ap} , os dois blocos se movem como se fossem um só.



Esta força produz a aceleração do conjunto de dois blocos.



Estas são as duas forças que agem sobre o bloco A. A resultante produz a aceleração do bloco A.



Esta é a única força responsável pela aceleração do bloco B.

Figura 5-18 (a) Uma força horizontal constante \vec{F}_{ap} é aplicada ao bloco A, que empurra o bloco B. (b) Duas forças horizontais agem sobre o bloco A. (c) Apenas uma força horizontal age sobre o bloco B.

Podemos usar a segunda lei de Newton para relacionar a força aplicada ao *conjunto dos dois blocos* à aceleração do *conjunto dos dois blocos* através da segunda lei de Newton. Assim, considerando apenas o eixo x , podemos escrever:

$$\vec{F}_{ap} = (m_A + m_B)\vec{a},$$

onde agora a força aplicada, \vec{F}_{ap} , está relacionada corretamente à massa total $m_A + m_B$. Explicitando a e substituindo os valores conhecidos, obtemos:

$$a = \frac{\vec{F}_{ap}}{m_A + m_B} = \frac{20\text{ N}}{4,0\text{ kg} + 6,0\text{ kg}} = 2,0\text{ m/s}^2.$$

(Resposta)

Assim, a aceleração do sistema (e de cada bloco) é no sentido positivo do eixo x e tem um módulo de $2,0\text{ m/s}^2$.

(b) Qual é a força (horizontal) \vec{F}_{BA} exercida pelo bloco A sobre o bloco B (Fig. 5-18c)?

IDEIA-CHAVE

Podemos usar a segunda lei de Newton para relacionar a força exercida sobre o bloco B à aceleração do bloco.

Cálculo Nesse caso, considerando apenas o eixo x , podemos escrever:

$$\vec{F}_{BA} = m_B\vec{a},$$

que, substituindo os valores conhecidos, nos dá

$$\vec{F}_{BA} = (6,0\text{ kg})(2,0\text{ m/s}^2) = 12\text{ N}. \quad (\text{Resposta})$$

Assim, a força \vec{F}_{BA} é orientada no sentido positivo do eixo x e tem um módulo de 12 N .

REVISÃO E RESUMO

Mecânica newtoniana Para que a velocidade de um objeto varie (ou seja, para que o objeto sofra uma aceleração), é preciso que ele seja submetido a uma **força** (empurra ou puxa) exercida por outro objeto. A *mecânica newtoniana* descreve a relação entre acelerações e forças.

Força A força é uma grandeza vetorial cujo módulo é definido em termos da aceleração que imprimaria a uma massa de um quilograma. Por definição, uma força que produz uma aceleração de 1 m/s^2 em uma massa de 1 kg tem um módulo de 1 newton (1 N). Uma força tem a mesma orientação que a aceleração produzida pela força. Duas ou mais forças podem ser combinadas segundo as regras da álgebra vetorial. A **força resultante** é a soma de todas as forças que agem sobre um corpo.

Primeira Lei de Newton Quando a força resultante que age sobre um corpo é nula, o corpo permanece em repouso ou se move em linha reta com velocidade escalar constante.

Referenciais Inerciais Os referenciais para os quais as leis de Newton são válidas são chamados de *referenciais inerciais*. Os referenciais para os quais as leis de Newton não são válidas são chamados de *referenciais não inerciais*.

Massa A **massa** de um corpo é a propriedade que relaciona a aceleração do corpo à força responsável pela aceleração. A massa é uma grandeza escalar.

Segunda Lei de Newton A força resultante \vec{F}_{res} que age sobre um corpo de massa m está relacionada à aceleração \vec{a} do corpo através da equação

$$\vec{F}_{res} = m\vec{a}. \quad (5-1)$$

que pode ser escrita em termos das componentes:

$$F_{res,x} = ma_x \quad F_{res,y} = ma_y \quad \text{e} \quad F_{res,z} = ma_z. \quad (5-2)$$

De acordo com a segunda lei, em unidades do SI,

$$1\text{ N} = 1\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2. \quad (5-3)$$

O **diagrama de corpo livre** é um diagrama simplificado no qual apenas *um corpo* é considerado. Esse corpo é representado por um ponto ou por um desenho. As forças externas que agem sobre o corpo são representadas por vetores e um sistema de coordenadas é superposto ao desenho, orientado de modo a simplificar a solução.

Algumas Forças Especiais A força **gravitacional** \vec{F}_g exercida sobre um corpo é um tipo especial de atração que um segundo corpo exerce sobre o primeiro. Na maioria das situações apresentadas neste livro, o segundo corpo é a Terra ou outro astro. No caso da Terra, a força é orientada para baixo, em direção ao solo, que é considerado um referencial inercial. O módulo de \vec{F}_g é

$$F_g = mg, \quad (5-8)$$

onde m é a massa do corpo e g é o módulo da aceleração em que o corpo é suspenso.

O peso P de um corpo é o módulo da força para cima necessária para equilibrar a força gravitacional a que o corpo está sujeito. O peso de um corpo está relacionado à massa através da equação

$$P = mg. \quad (5-12)$$

A **força normal** \vec{F}_N é a força exercida sobre um corpo pela superfície na qual o corpo está apoiado. A força normal é sempre perpendicular à superfície.

A **força de atrito** \vec{f} é a força exercida sobre um corpo quando o corpo desliza ou tenta deslizar sobre uma superfície. A força é sempre paralela à superfície e tem o sentido oposto ao do deslizamento. Em uma *superfície ideal*, a força de atrito é desprezível.

Quando uma corda está sob **tensão**, cada extremidade da corda exerce uma força sobre um corpo. A força é orientada ao longo da corda, para longe do ponto onde a corda está presa ao corpo. No caso de uma *corda sem massa* (uma corda de massa desprezível), as tensões nas duas extremidades da corda têm o mesmo módulo T , mesmo que a corda passe por uma *polia sem massa e sem atrito* (uma polia de massa desprezível cujo eixo tem um atrito desprezível).

Terceira Lei de Newton Se um corpo C aplica a um corpo B uma força \vec{F}_{BC} , o corpo B aplica ao corpo C uma força \vec{F}_{CB} tal que

$$\vec{F}_{BC} = -\vec{F}_{CB}.$$

P E R G U N T A S

- 1 A Fig. 5-19 mostra diagramas de corpo livre de quatro situações nas quais um objeto, visto de cima, é puxado por várias forças em um piso sem atrito. Em quais dessas situações a aceleração \vec{a} do objeto possui (a) uma componente x e (b) uma componente y ? (c) Em cada situação, indique a orientação de \vec{a} citando um quadrante ou um semieixo. (Isto pode ser feito com alguns cálculos mentais.)

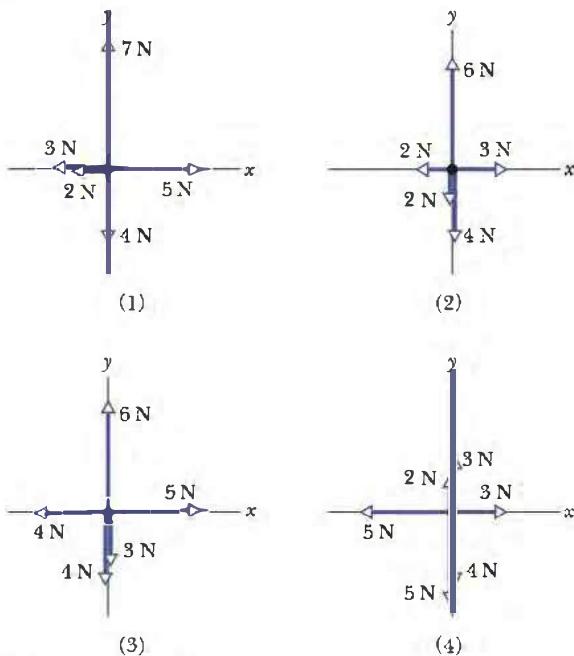


Figura 5-19 Pergunta 1.

- 2 Duas forças horizontais,

$$\vec{F}_1 = (3 \text{ N})\hat{i} - (4 \text{ N})\hat{j} \quad \text{e} \quad \vec{F}_2 = -(1 \text{ N})\hat{i} - (2 \text{ N})\hat{j}$$

puxam um banana split no balcão sem atrito de uma lanchonete. Determine, sem usar uma calculadora, quais dos vetores do diagrama de corpo livre da Fig. 5-20 representam melhor (a) \vec{F}_1 e (b) \vec{F}_2 . Qual é a componente da força resultante (c) ao longo do eixo x e (d) ao longo do eixo y ? Para que quadrante aponta o vetor (e) da força resultante e (f) da aceleração do sorvete?

- 3 Na Fig. 5-21, as forças \vec{F}_1 e \vec{F}_2 são aplicadas a uma caixa que desliza com velocidade constante sobre uma superfície sem atrito. Diminuímos o ângulo θ sem mudar o módulo de \vec{F}_1 . Para manter

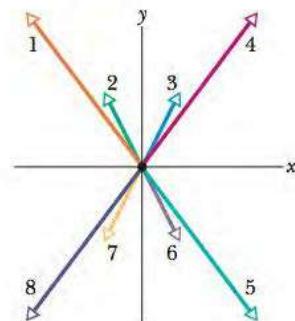


Figura 5-20 Pergunta 2.

a caixa deslizando com velocidade constante, devemos aumentar, diminuir ou manter inalterado o módulo de \vec{F}_2 ?

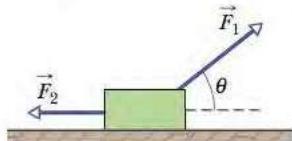


Figura 5-21 Pergunta 3.

- 4 No instante $t = 0$, uma força \vec{F} constante começa a atuar sobre uma pedra que se move no espaço sideral no sentido positivo do eixo x . (a) Para $t > 0$, quais são as possíveis funções $x(t)$ para a posição da pedra: (1) $x = 4t - 3$, (2) $x = -4t^2 + 6t - 3$, (3) $x = 4t^2 + 6t - 3$? (b) Para que função \vec{F} tem o sentido contrário ao do movimento inicial da pedra?

- 5 A Fig. 5-22 mostra vistas superiores de quatro situações nas quais forças atuam sobre um bloco que está em um piso sem atrito. Em que situações é possível, para certos valores dos módulos das forças, que o bloco esteja (a) em repouso e (b) se movendo com velocidade constante?

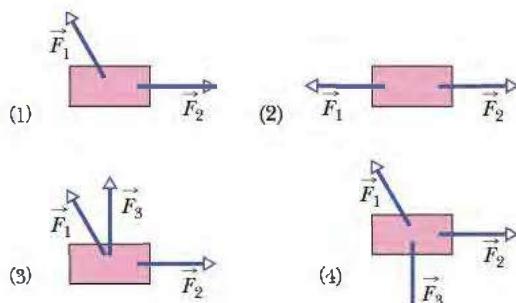


Figura 5-22 Pergunta 5.

- 6** A Fig. 5-23 mostra uma caixa em quatro situações nas quais forças horizontais são aplicadas. Ordene as situações de acordo com o módulo da aceleração da caixa, começando pelo maior.

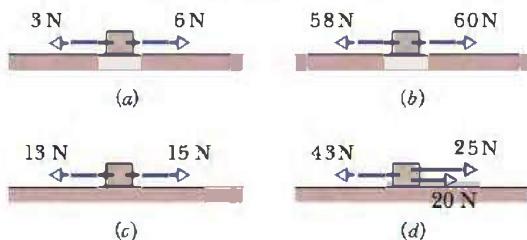


Figura 5-23 Pergunta 6.

- 7** Kansas City, 17 de julho de 1981: o hotel Hyatt Regency, recém-inaugurado, recebe centenas de pessoas, que escutam e dançam sucessos da década de 1940 ao som de uma banda. Muitos se aglomeraram nas passarelas que se estendem como pontes por cima do grande saguão. De repente, duas passarelas cedem, caindo sobre a multidão.

As passarelas eram sustentadas por hastes verticais e mantidas no lugar por porcas atarraxadas nas hastes. No projeto original, seriam usadas apenas duas hastes compridas, presas no teto, que sustentariam as três passarelas (Fig. 5-24a). Se cada passarela e as pessoas que se encontram sobre ela têm uma massa total M , qual é a massa total sustentada por duas porcas que estão (a) na passarela de baixo e (b) na passarela de cima?

Como não é possível atarraxar uma porca em uma haste a não ser nas extremidades, o projeto foi modificado. Em vez de duas hastes, foram usadas seis, duas presas ao teto e quatro ligando as passarelas duas a duas (Fig. 5-24b). Qual é agora a massa total sustentada por duas porcas que estão (c) na passarela de baixo, (d) no lado de cima da passarela de cima e (e) no lado de baixo da passarela de cima? Foi esta modificação do projeto original que causou a tragédia.

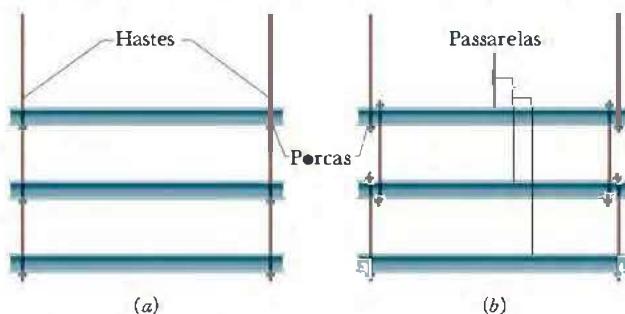


Figura 5-24 Pergunta 7.

- 8** A Fig. 5-25 mostra três gráficos da componente de uma velocidade $v_x(t)$ e três gráficos da componente $v_y(t)$. Os gráficos não estão em escala. Que gráfico de $v_x(t)$ e que gráfico de $v_y(t)$ correspondem melhor a cada uma das situações da Pergunta 1 (Fig. 5-19)?

- 9** A Fig. 5-26 mostra um conjunto de quatro blocos sendo puxados por uma força \vec{F} em um piso sem atrito. Que massa total é acelerada para a direita (a) pela força \vec{F} , (b) pela corda 3 e (c) pela corda 1? (d) Ordene os blocos de acordo com a aceleração, começando pela maior. (e) Ordene as cordas de acordo com a tensão, começando pela maior.

- 10** A Fig. 5-27 mostra três blocos sendo empurrados sobre um piso sem atrito por uma força horizontal \vec{F} . Que massa total é acelerada para a direita (a) pela força \vec{F} , (b) pela força \vec{F}_{21} exercida pelo bloco 1 sobre o bloco 2 e (c) pela força \vec{F}_{32} exercida pelo bloco 2 sobre o

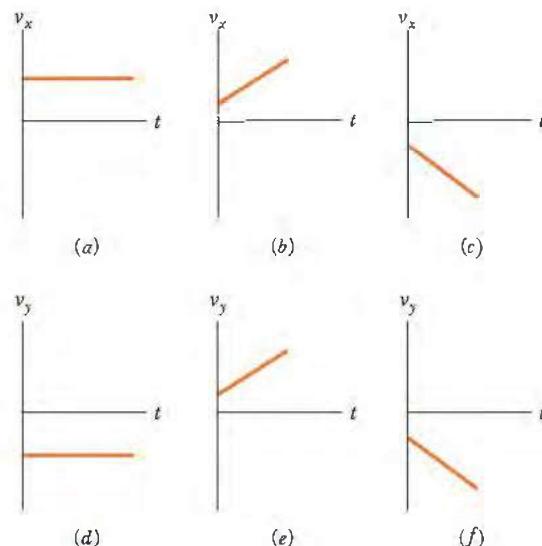


Figura 5-25 Pergunta 8.



Figura 5-26 Pergunta 9.

- bloco 3? (d) Ordene os blocos de acordo com o módulo da aceleração, começando pelo maior. (e) Ordene as forças \vec{F} , \vec{F}_{21} e \vec{F}_{32} de acordo com o módulo, começando pelo maior.

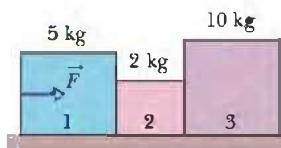


Figura 5-27 Pergunta 10.

- 11** Uma força vertical \vec{F} é aplicada a um bloco de massa m que está sobre um piso. O que acontece com o módulo da força normal \vec{F}_N que o piso exerce sobre o bloco quando o módulo de \vec{F} aumenta a partir de zero, se a força \vec{F} aponta (a) para baixo e (b) para cima?

- 12** A Fig. 5-28 mostra quatro opções para a orientação de uma força de módulo F a ser aplicada a um bloco que se encontra sobre um plano inclinado. A força pode ser horizontal ou vertical. (No caso da opção b, a força não é suficiente para levantar o bloco, afastando-o da superfície.) Ordene as opções de acordo com o módulo da força normal exercida pelo plano sobre o bloco, começando pela maior.

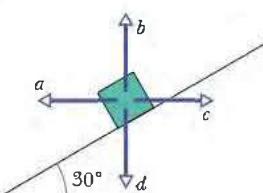


Figura 5-28 Pergunta 12.

PROBLEMAS

••• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Círculo Voador da Física* de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Seção 5-6 A Segunda Lei de Newton

•1 Apenas duas forças horizontais atuam em um corpo de 3,0 kg que pode se mover em um piso sem atrito. Uma força é de 9,0 N e aponta para o leste; a outra é de 8,0 N e atua 62° ao norte do oeste. Qual é o módulo da aceleração do corpo?

•2 Duas forças horizontais agem sobre um bloco de madeira de 2,0 kg que pode deslizar sem atrito em uma bancada de cozinha, situada em um plano xy . Uma das forças é $\vec{F}_1 = (3,0 \text{ N})\hat{i} + (4,0 \text{ N})\hat{j}$. Determine a aceleração do bloco em termos dos vetores unitários se a outra força é (a) $\vec{F}_2 = (-3,0 \text{ N})\hat{i} + (-4,0 \text{ N})\hat{j}$, (b) $\vec{F}_2 = (-3,0 \text{ N})\hat{i} + (4,0 \text{ N})\hat{j}$ e (c) $\vec{F}_2 = (3,0 \text{ N})\hat{i} + (-4,0 \text{ N})\hat{j}$.

•3 Se um corpo padrão de 1 kg tem uma aceleração de 2,00 m/s^2 a 20,0° com o semieixo x positivo, quais são (a) a componente x e (b) a componente y da força resultante a que o corpo está submetido e (c) qual é a força resultante em termos dos vetores unitários?

••4 Sob a ação de duas forças, uma partícula se move com velocidade constante $\vec{v} = (3 \text{ m/s})\hat{i} - (4 \text{ m/s})\hat{j}$. Uma das forças é $\vec{F}_1 = (2 \text{ N})\hat{i} + (-6 \text{ N})\hat{j}$. Qual é a outra?

••5 Três astronautas, impulsionados por mochilas a jato, empurram e guiam um asteroide de 120 kg para uma base de manutenção, exercendo as forças mostradas na Fig. 5-29, com $F_1 = 32 \text{ N}$, $F_2 = 55 \text{ N}$, $F_3 = 41 \text{ N}$, $\theta_1 = 30^\circ$ e $\theta_3 = 60^\circ$. Determine a aceleração do asteroide (a) em termos dos vetores unitários e como (b) um módulo e (c) um ângulo em relação ao semieixo x positivo.

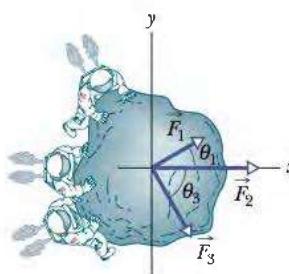


Figura 5-29 Problema 5.

••6 Em um cabo-de-guerra bidimensional, Alexandre, Bárbara e Carlos puxam horizontalmente um pneu de automóvel nas orientações mostradas na vista superior da Fig. 5-30. A pesar dos esforços da trinca, o pneu permanece no mesmo lugar. Alexandre puxa com uma força \vec{F}_A de módulo 220 N e Carlos puxa com uma força \vec{F}_C de módulo 170 N. Observe que a orientação de \vec{F}_C não é dada. Qual é o módulo da força \vec{F}_B exercida por Bárbara?

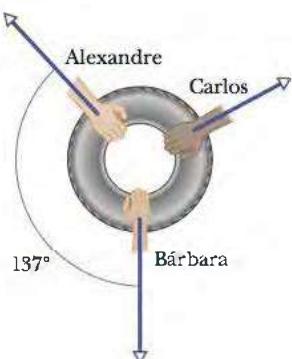


Figura 5-30 Problema 6.

••7 Duas forças agem sobre a caixa de 2,00 kg vista de cima na Fig. 5-31, mas apenas uma é mostrada. Para $F_1 = 20,0 \text{ N}$, $a = 12,0 \text{ m/s}^2$ e $\theta = 30,0^\circ$, determine a segunda força (a) em termos dos vetores unitários e como um (b) módulo e (c) um ângulo em relação ao semieixo x positivo.

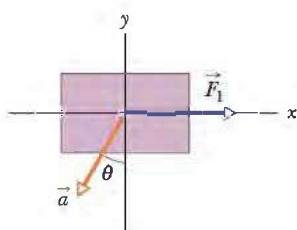


Figura 5-31 Problema 7.

••8 Um objeto de 2,00 kg está sujeito a três forças, que lhe imprimem uma aceleração $\vec{a} = -(8,00 \text{ m/s}^2)\hat{i} + (6,00 \text{ m/s}^2)\hat{j}$. Se duas das forças são $\vec{F}_1 = (30,0 \text{ N})\hat{i} + (16,0 \text{ N})\hat{j}$ e $\vec{F}_2 = -(12,0 \text{ N})\hat{i} + (8,00 \text{ N})\hat{j}$, determine a terceira.

••9 Uma partícula de 0,340 kg se move no plano xy de acordo com as equações $x(t) = -15,00 + 2,00t - 4,00t^3$ e $y(t) = 25,00 + 7,00t - 9,00t^2$, com x e y em metros e t em segundos. No instante $t = 0,700 \text{ s}$, quais são (a) o módulo e (b) o ângulo (em relação ao semieixo x positivo) da força resultante a que está submetida a partícula e (c) qual é o ângulo da direção de movimento da partícula?

••10 Uma partícula de 0,150 kg se move ao longo de um eixo x de acordo com a equação $x(t) = -13,00 + 2,00t + 4,00t^2 - 3,00t^3$, com x em metros e t em segundos. Qual é, na notação dos vetores unitários, a força que age sobre a partícula no instante $t = 3,40 \text{ s}$?

••11 Uma partícula de 2,0 kg se move ao longo de um eixo x sob a ação de uma força variável. A posição da partícula é dada por $x = 3,0 \text{ m} + (4,0 \text{ m/s})t + ct^2 - (2,0 \text{ m/s}^3)t^3$, com x em metros e t em segundos. O fator c é constante. No instante $t = 3,0 \text{ s}$, a força que age sobre a partícula tem um módulo de 36 N e aponta no sentido negativo do eixo x . Qual é o valor de c ?

••12 Duas forças horizontais \vec{F}_1 e \vec{F}_2 agem sobre um disco de 4,0 kg que desliza sem atrito sobre o gelo, no qual foi desenhado um sistema de coordenadas xy . A força \vec{F}_1 aponta no sentido positivo do eixo x e tem um módulo de 7,0 N. A força \vec{F}_2 tem um módulo de 9,0 N. A Fig. 5-32 mostra a componente v_x da velocidade do disco em função do tempo t . Qual é o ângulo entre as orientações constantes das forças \vec{F}_1 e \vec{F}_2 ?

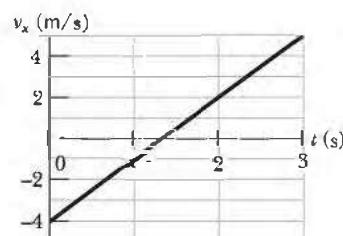


Figura 5-32 Problema 12.

Seção 5-7 Algumas Forças Especiais

- 13 A Fig. 5-33 mostra um arranjo no qual quatro discos estão suspensos por cordas. A corda mais comprida, no alto, passa por uma polia sem atrito e exerce uma força de 98 N sobre a parede à qual está presa. As tensões nas cordas mais curtas são $T_1 = 58,8 \text{ N}$, $T_2 = 49,0 \text{ N}$ e $T_3 = 9,8 \text{ N}$. Quais são as massas (a) do disco A, (b) do disco B, (c) do disco C e (d) do disco D?

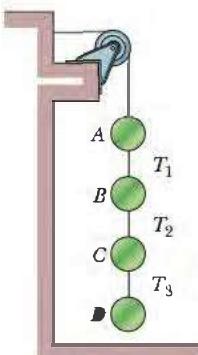


Figura 5-33 Problema 13.

- 14 Um bloco com um peso de 3,0 N está em repouso em uma superfície horizontal. Uma força para cima de 1,0 N é aplicada ao corpo através de uma mola vertical. Quais são (a) o módulo e (b) o sentido da força exercida pelo bloco sobre a superfície horizontal?

- 15 (a) Um salame de 11,0 kg está pendurado por uma corda em uma balança de mola, que está presa ao teto por outra corda (Fig. 5-34a). Qual é a leitura da balança, cuja escala está em unidades de peso? (b) Na Fig. 5-34b o salame está suspenso por uma corda que passa por uma roldana e está preso a uma balança de mola. A extremidade oposta da balança está presa a uma parede por outra corda. Qual é a leitura da balança? (c) Na Fig. 5-34c a parede foi substituída por um segundo salame de 11,0 kg e o sistema está em repouso. Qual é a leitura da balança?

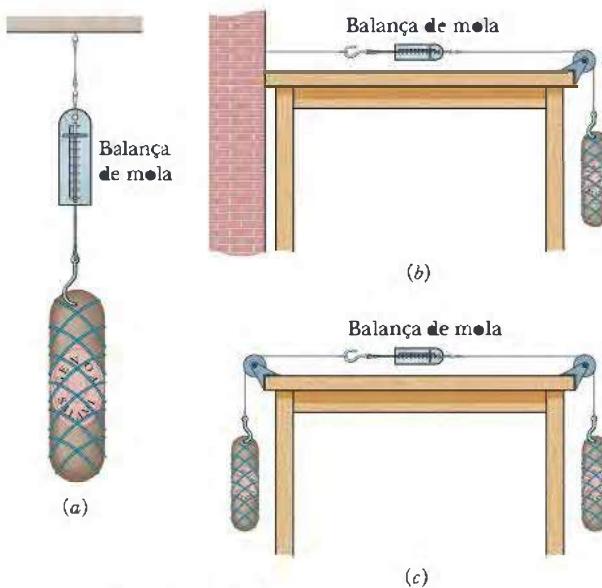


Figura 5-34 Problema 15.

- 16 Alguns insetos podem se deslocar pendurados em gravetos. Suponha que um desses insetos tenha massa m e esteja pendurado em um graveto horizontal, como mostra a Fig. 5-35, com um ângulo

$\theta = 40^\circ$. As seis pernas do inseto estão sob a mesma tensão e as seções das pernas mais próximas do corpo são horizontais. (a) Qual é a razão entre a tensão em cada tibia (extremidade da perna) e o peso do inseto? (b) Se o inseto estica um pouco as pernas, a tensão nas tibias aumenta, diminui ou continua a mesma?

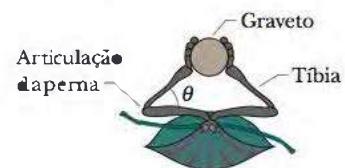


Figura 5-35 Problema 16.

Seção 5-9 Aplicando as Leis de Newton

- 17 Na Fig. 5-36, a massa do bloco é 8,5 kg e o ângulo θ é 30° . Determine (a) a tensão na corda e (b) a força normal que age sobre o bloco. (c) Determine o módulo da aceleração do bloco se a corda for cortada.

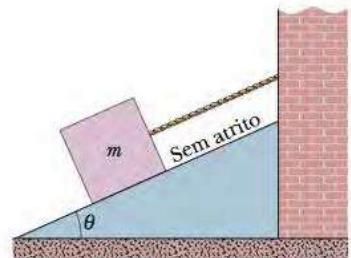


Figura 5-36 Problema 17.

- 18 Em abril de 1974, o belga John Massis conseguiu puxar dois vagões de passageiros mordendo um freio preso por uma corda aos vagões e se inclinando para trás com as pernas apoiadas nos dormentes da ferrovia. Os vagões pesavam 700 kN (cerca de 80 toneladas). Suponha que Massis tenha puxado com uma força constante de módulo 2,5 vezes maior que seu peso e ângulo θ de 30° com a horizontal. Sua massa era 80 kg e ele fez os vagões se deslocarem de 1,0 m. Desprezando as forças de atrito, determine a velocidade dos vagões quando Massis parou de puxar.

- 19 Qual é o módulo da força necessária para acelerar um trenó-foguete de 500 kg até 1600 km/h em 1,8 s, partindo do repouso?

- 20 Um carro a 53 km/h se choca com um pilar de uma ponte. Um passageiro do carro se desloca para a frente de uma distância de 65 cm (em relação à estrada) até ser imobilizado por um airbag inflado. Qual é o módulo da força (suposta constante) que atua sobre o tronco do passageiro, que tem uma massa de 41 kg?

- 21 Uma força horizontal constante \vec{F}_a empurra um pacote dos correios de 2,00 kg sobre um piso sem atrito onde um sistema de coordenadas xy foi desenhado. A Fig. 5-37 mostra as componentes x e y da velocidade do pacote em função do tempo t . Quais são (a) o módulo e (b) a orientação de \vec{F}_a ? Ver Fig. 5-37, adiante.

- 22 Um homem está sentado em um brinquedo de parque de diversões no qual uma cabina é acelerada para baixo, no sentido negativo do eixo y , com uma aceleração cujo módulo é $1,24g$, com $g = 9,80 \text{ m/s}^2$. Uma moeda de 0,567 g repousa no joelho do homem. Depois que a cabina começa a se mover e em termos dos vetores unitários, qual é a aceleração da moeda (a) em relação ao solo e (b) em relação ao homem? (c) Quanto tempo a moeda leva para chegar ao teto da cabina, 2,20 m acima do joelho? Em termos dos vetores unitários, qual é (d) a força a que está submetida a moeda e (e) a força aparente a que está submetida a moeda do ponto de vista do homem?

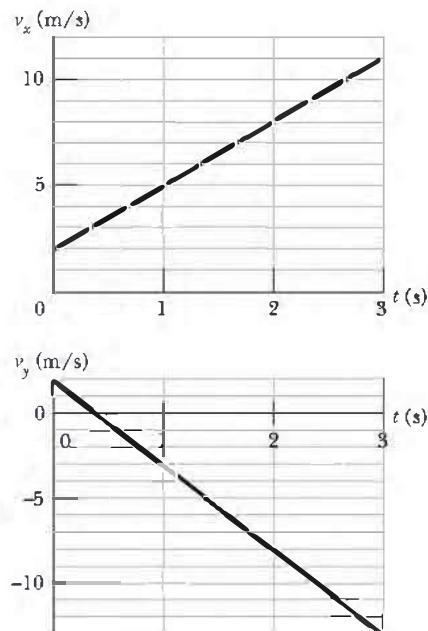


Figura 5-37 Problema 21.

•23 Tarzan, que pesa 820 N, salta de um rochedo na ponta de um cipó de 20,0 m que está preso ao galho de uma árvore e faz inicialmente um ângulo de $22,0^\circ$ com a vertical. Suponha que um eixo x é traçado horizontalmente a partir da borda do rochedo e que um eixo y é traçado verticalmente para cima. Imediatamente após Tarzan pular da encosta, a tensão do cipó é 760 N. Nesse instante, quais são (a) a força do cipó sobre Tarzan em termos dos vetores unitários, a força resultante sobre Tarzan (b) em termos dos vetores unitários e como (c) módulo e (d) ângulo em relação ao sentido positivo do eixo x . Quais são (e) o módulo e (f) o ângulo da aceleração de Tarzan nesse instante?

•24 Existem duas forças horizontais atuando na caixa de 2,0 kg da Fig. 5-39, mas a vista superior mostra apenas uma (de módulo $F_1 = 20 \text{ N}$). A caixa se move ao longo do eixo x . Para cada um dos valores da aceleração a_x da caixa, determine a segunda força em termos dos vetores unitários: (a) 10 m/s^2 , (b) 20 m/s^2 , (c) 0, (d) -10 m/s^2 e (e) -20 m/s^2 .

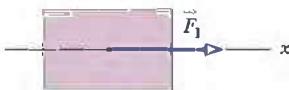


Figura 5-38 Problema 24.

•25 Propulsão solar. Um “iate solar” é uma nave espacial com uma grande vela que é empurrada pela luz do Sol. Embora esse empurrão seja fraco em circunstâncias normais, pode ser suficiente para afastar a nave do Sol em uma viagem gratuita, mas muito lenta. Suponha que a espaçonave tenha uma massa de 900 kg e receba um empurrão de 20 N. (a) Qual é o módulo da aceleração resultante? Se a nave parte do repouso, (b) que distância percorre em um dia e (c) qual é a velocidade no final do dia?

•26 A tensão para a qual uma linha de pescar arrebenta é chamada de “resistência” da linha. Qual é a resistência mínima necessária para que a linha faça parar um salmão de 85 N de peso em 11 cm se o peixe está inicialmente se deslocando a 2,8 m/s? Considere uma desaceleração constante.

•27 Um elétron com uma velocidade de $1,2 \times 10^7 \text{ m/s}$ penetra horizontalmente em uma região onde está sujeito a uma força vertical constante de $4,5 \times 10^{-16} \text{ N}$. A massa do elétron é $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$. Determine a deflexão vertical sofrida pelo elétron enquanto percorre uma distância horizontal de 30 mm.

•28 Um carro que pesa $1,30 \times 10^4 \text{ N}$ está se movendo a 40 km/h quando os freios são aplicados, fazendo o carro parar depois de percorrer 15 m. Supondo que a força aplicada pelo freio é constante, determine (a) o módulo da força e (b) o tempo necessário para o carro parar. Se a velocidade inicial é multiplicada por dois e o carro experimenta a mesma força durante a frenagem, por que fatores são multiplicados (c) a distância até o carro parar e (d) o tempo necessário para o carro parar? (Isto poderia ser uma lição sobre o perigo de dirigir em altas velocidades.)

•29 Um bombeiro que pesa 712 N escorrega por um poste vertical com uma aceleração de $3,00 \text{ m/s}^2$, dirigida para baixo. Quais são (a) o módulo e (b) o sentido (para cima ou para baixo) da força vertical exercida pelo poste sobre o bombeiro e (c) o módulo e (d) o sentido da força vertical exercida pelo bombeiro sobre o poste?

•30 Os ventos violentos de um tornado podem fazer com que pequenos objetos fiquem encravados em árvores, paredes de edifícios e até mesmo em placas de sinalização de metal. Em uma simulação em laboratório, um palito comum de madeira foi disparado por um canhão pneumático contra um galho de carvalho. A massa do palito era 0,13 g, a velocidade antes de penetrar no galho era 220 m/s e a profundidade de penetração foi 15 mm. Se o palito sofreu uma desaceleração constante, qual foi o módulo da força exercida pelo galho sobre o palito?

•31 Um bloco começa a subir um plano inclinado sem atrito com uma velocidade inicial $v_0 = 3,50 \text{ m/s}$. O ângulo do plano inclinado é $\theta = 32,0^\circ$. (a) Que distância ao longo do plano inclinado o bloco consegue atingir? (b) Quanto tempo o bloco leva para percorrer essa distância? (c) Qual é a velocidade do bloco ao chegar de volta ao ponto de partida?

•32 A Fig. 5-39 mostra uma vista superior de um disco de 0,0250 kg sobre uma mesa sem atrito e duas das três forças que agem sobre o disco. A força \vec{F}_1 tem um módulo de 6,00 N e um ângulo $\theta_1 = 30,0^\circ$. A força \vec{F}_2 tem um módulo de 7,00 N e um ângulo $\theta_2 = 30,0^\circ$. Em termos dos vetores unitários, qual é a terceira força se o disco (a) está em repouso, (b) tem uma velocidade constante $\vec{v} = (13,0\hat{i} - 14,0\hat{j}) \text{ m/s}$ e (c) tem uma velocidade variável $\vec{v} = (13,0t\hat{i} - 14,0t\hat{j}) \text{ m/s}^2$, onde t é o tempo?

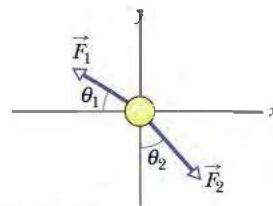


Figura 5-39 Problema 32.

•33 Um elevador e sua carga têm uma massa total de 1600 kg. Determine a tensão do cabo de sustentação quando o elevador, que estava descendo a 12 m/s, é levado ao repouso com aceleração constante em uma distância de 42 m.

•34 Na Fig. 5-40, um caixote de massa $m = 100 \text{ kg}$ é empurrado por uma força horizontal \vec{F} que o faz subir uma rampa sem atrito ($\theta = 30,0^\circ$) com velocidade constante. Quais são os módulos (a) de \vec{F} e (b) da força que a rampa exerce sobre o caixote?

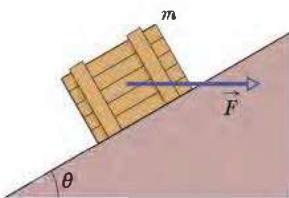


Figura 5-40 Problema 34.

••35 A velocidade de uma partícula de 3,00 kg é dada por $\vec{v} = (8,00t\hat{i} + 3,00t^2\hat{j})$ m/s, com o tempo t em segundos. No instante em que a força resultante que age sobre a partícula tem um módulo de 35,0 N, quais são as orientações (em relação ao sentido positivo do eixo x) (a) da força resultante e (b) do movimento da partícula?

••36 Um esquiador de 50 kg é puxado para o alto de uma encosta sem atrito segurando um cabo que se move paralelamente à encosta, que faz um ângulo de 8,0° com a horizontal. Qual é o módulo F_{cabo} da força que o cabo exerce sobre o esquiador (a) se o módulo v da velocidade do esquiador é constante e igual a 2,0 m/s e (b) se v aumenta a uma taxa de 0,10 m/s²?

••37 Uma moça de 40 kg e um trenó de 8,4 kg estão sobre a superfície sem atrito de um lago congelado, separados por uma distância de 15 m, mas unidos por uma corda de massa desprezível. A moça exerce uma força horizontal de 5,2 N sobre a corda. Qual é o módulo da aceleração (a) do trenó e (b) da moça? (c) A que distância da posição inicial da moça os dois se tocam?

••38 Um esquiador de 40 kg desce uma rampa sem atrito que faz um ângulo de 10° com a horizontal. Suponha que o esquiador se desloca no sentido negativo de um eixo x orientado ao longo da rampa. O vento exerce uma força sobre o esquiador de componente F_x . Quanto vale F_x se o módulo da velocidade do esquiador (a) é constante, (b) aumenta a uma taxa de 1,0 m/s² e (c) aumenta a uma taxa de 2,0 m/s²?

••39 Uma esfera com uma massa de $3,0 \times 10^{-4}$ kg está suspensa por uma corda. Uma brisa horizontal constante empurra a esfera de tal forma que a corda faz um ângulo de 37° com a vertical. Determine (a) a força da brisa sobre a bola e (b) a tensão da corda.

••40 Uma caixa com uma massa de 5,00 kg sobe uma rampa sem atrito que faz um ângulo θ com a horizontal. A Fig. 5-41 mostra, em função do tempo t , a componente v_x da velocidade da caixa ao longo de um eixo x orientado para cima ao longo da rampa. Qual é o módulo da força normal que a rampa exerce sobre a caixa?

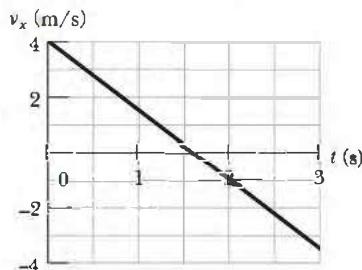


Figura 5-41 Problema 40.

••41 Usando um cabo que arrebentará se a tensão exceder 387 N, você precisa baixar uma caixa de telhas velhas com um peso de 449 N a partir de um ponto a 6,1 m acima do chão. (a) Qual é o módulo da aceleração da caixa que coloca o cabo na iminência de arrebentar? (b) Com essa aceleração, qual é a velocidade da caixa ao atingir o chão?

••42 No passado, cavalos eram usados para puxar barcaças em canais, como mostra a Fig. 5-42. Suponha que o cavalo puxa o cabo com uma força de módulo 7900 N e ângulo $\theta = 18^\circ$ em relação à direção do movimento da barcaça, que se desloca no sentido positivo de um eixo x . A massa da barcaça é 9500 kg e o módulo da aceleração da barcaça é 0,12 m/s². Quais são (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao sentido positivo do eixo x) da força exercida pela água sobre a barcaça?

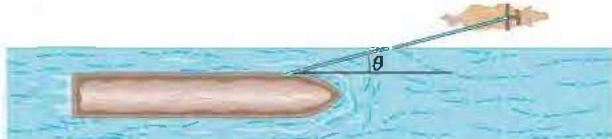


Figura 5-42 Problema 42.

••43 Na Fig. 5-43, uma corrente composta por cinco elos, cada um de massa 0,100 kg, é erguida verticalmente com uma aceleração constante de módulo $a = 2,50$ m/s². Determine o módulo (a) da força exercida pelo elo 2 sobre o elo 1, (b) da força exercida pelo elo 3 sobre o elo 2, (c) da força exercida pelo elo 4 sobre o elo 3 e (d) da força exercida pelo elo 5 sobre o elo 4. Determine o módulo (e) da força \vec{F} exercida pela pessoa que está levantando a corrente sobre o elo 5 e (f) a força resultante que acelera cada elo.

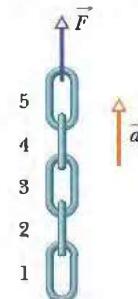


Figura 5-43 Problema 43.

••44 Uma lâmpada está pendurada verticalmente por um fio em um elevador que desce com uma desaceleração de 2,4 m/s². (a) Se a tensão do fio é 89 N, qual é a massa da lâmpada? (b) Qual é a tensão do fio quando o elevador sobe com uma aceleração de 2,4 m/s²?

••45 Um elevador que pesa 27,8 kN move-se para cima. Qual é a tensão do cabo do elevador se a velocidade (a) está aumentando a uma taxa de 1,22 m/s² e (b) está diminuindo a uma taxa de 1,22 m/s²?

••46 Um elevador é puxado para cima por um cabo. O elevador e seu único ocupante têm uma massa total de 2000 kg. Quando o ocupante deixa cair uma moeda, a aceleração da moeda em relação ao elevador é 8,00 m/s² para baixo. Qual é a tensão do cabo?

••47 A família Zacchini ficou famosa pelos números de circo em que um membro da família era disparado de um canhão com a ajuda de elásticos ou ar comprimido. Em uma versão do número, Emanuel Zacchini foi disparado por cima de três rodas gigantes e aterrissou em uma rede, na mesma altura que a boca do canhão, a 69 m de distância. Ele foi impulsionado dentro do cano por uma distância de 5,2 m e lançado com um ângulo de 53°. Se sua massa era 85 kg e ele sofreu uma aceleração constante no interior do cano, qual foi o módulo da força responsável pelo lançamento? (Sugestão: trate o lançamento como se acontecesse ao longo de uma rampa de 53°. Despreze a resistência do ar.)

••48 Na Fig. 5-44, os elevadores *A* e *B* estão ligados por um cabo e podem ser levantados ou baixados por outro cabo que está acima do

elevador A. A massa do elevador A é 1700 kg; a massa do elevador B é 1300 kg. O piso do elevador A sustenta uma caixa de 12,0 kg. A tensão do cabo que liga os elevadores é $1,91 \times 10^4$ N. Qual é o módulo da força normal que o piso do elevador A exerce sobre a caixa?

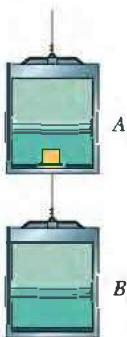


Figura 5-44 Problema 48.

••49 Na Fig. 5-45, um bloco de massa $m = 5,00$ kg é puxado ao longo de um piso horizontal sem atrito por uma corda que exerce uma força de módulo $F = 12,0$ N e ângulo $\theta = 25,0^\circ$. (a) Qual é o módulo da aceleração do bloco? (b) O módulo da força F é aumentado lentamente. Qual é o valor do módulo da força imediatamente antes de o bloco perder contato com o piso? (c) Qual é o módulo da aceleração do bloco na situação do item (b)?

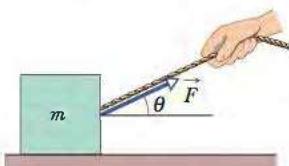


Figura 5-45 Problemas 49 e 60.

••50 Na Fig. 5-46, três caixas são conectadas por cordas, uma das quais passa por uma polia de atrito e massa desprezíveis. As massas das caixas são $m_A = 30,0$ kg, $m_B = 40,0$ kg e $m_C = 10,0$ kg. Quando o conjunto é liberado a partir do repouso, (a) qual é a tensão da corda que liga B a C e (b) que distância A percorre nos primeiros 0,250 s (supondo que não atinja a polia)?

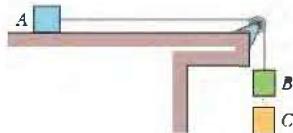


Figura 5-46 Problema 50.

••51 A Fig. 5-47 mostra dois blocos ligados por uma corda (de massa desprezível) que passa por uma polia sem atrito (também de massa desprezível). O conjunto é conhecido como *máquina de Atwood*. Um bloco tem massa $m_1 = 1,30$ kg; o outro tem massa $m_2 = 2,80$ kg. Quais são (a) o módulo da aceleração dos blocos e (b) a tensão da corda?

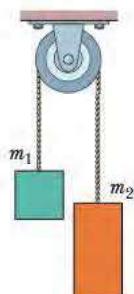


Figura 5-47 Problemas 51 e 65.

••52 Um homem de 85 kg desce de uma altura de 10,0 m em relação ao solo pendurado em uma corda que passa por uma toldana sem atrito e está presa na outra extremidade a um saco de areia de 65 kg. Com que velocidade o homem atinge o solo se partiu do repouso?

••53 Na Fig. 5-48, três blocos conectados são puxados para a direita sobre uma mesa horizontal sem atrito por uma força de módulo $T_3 = 65,0$ N. Se $m_1 = 12,0$ kg, $m_2 = 24,0$ kg e $m_3 = 31,0$ kg, calcule (a) o módulo da aceleração do sistema, (b) a tensão T_1 e (c) a tensão T_2 .

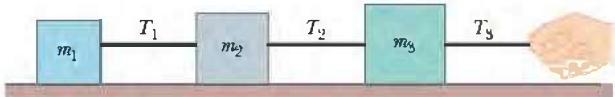


Figura 5-48 Problema 53.

••54 A Fig. 5-49 mostra quatro pinguins que estão sendo puxados sobre gelo muito escorregadio (sem atrito) por um zelador. As massas de três pinguins e as tensões em duas das cordas são $m_1 = 12$ kg, $m_3 = 15$ kg, $m_4 = 20$ kg, $T_2 = 111$ N e $T_4 = 222$ N. Determine a massa do pinguim m_2 , que não é dada.

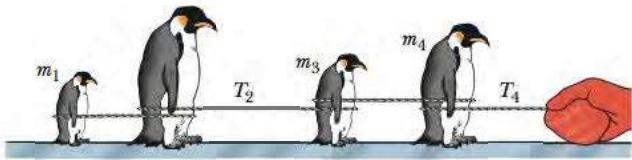


Figura 5-49 Problema 54.

••55 Dois blocos estão em contato em uma mesa sem atrito. Uma força horizontal é aplicada ao bloco maior, como mostra a Fig. 5-50. (a) Se $m_1 = 2,3$ kg, $m_2 = 1,2$ kg e $F = 3,2$ N, determine o módulo da força entre os dois blocos. (b) Mostre que se uma força de mesmo módulo F for aplicada ao menor dos blocos no sentido oposto, o módulo da força entre os blocos será 2,1 N, que não é o mesmo valor calculado no item (a). (c) Explique a razão da diferença.

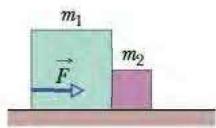


Figura 5-50 Problema 55.

••56 Na Fig. 5-51a, uma força horizontal constante \vec{F}_a é aplicada ao bloco A, que empurra um bloco B com uma força de 20,0 N dirigida horizontalmente para a direita. Na Fig. 5-51b, a mesma força \vec{F}_a é aplicada ao bloco B; desta vez, o bloco A empurra o bloco B com uma força de 10,0 N dirigida horizontalmente para a esquerda. Os blocos têm uma massa total de 12,0 kg. Quais são os módulos (a) da aceleração na Fig. 5-51a e (b) da força \vec{F}_a ?

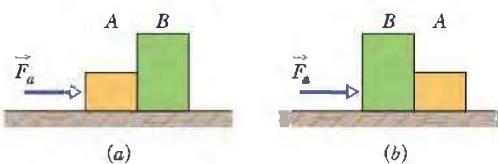


Figura 5-51 Problema 56.

••57 Um bloco de massa $m_1 = 3,70$ kg sobre um plano sem atrito inclinado, de ângulo $\theta = 30,0^\circ$, está preso por uma corda de massa desprezível, que passa por uma polia de massa e atrito desprezíveis, a um outro bloco de massa $m_2 = 2,30$ kg (Fig. 5-52). Quais são (a)

o módulo da aceleração de cada bloco, (b) o sentido da aceleração do bloco que está pendurado e (c) a tensão da corda?

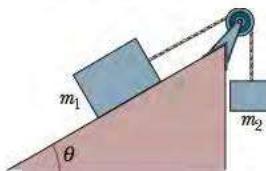


Figura 5-52 Problema 57.

••58 A Fig. 5-53 mostra um homem sentado em uma cadeira presa a uma corda de massa desprezível que passa por uma roldana de massa e atrito desprezíveis e desce de volta às mãos do homem. A massa total do homem e da cadeira é 95,0 kg. Qual é o módulo de força com a qual o homem deve puxar a corda para que a cadeira suba (a) com velocidade constante e (b) com uma aceleração para cima de $1,30 \text{ m/s}^2$? (Sugestão: um diagrama de corpo livre pode ajudar bastante.) Se no lado direito a corda se estende até o solo e é puxada por outra pessoa, qual é o módulo da força com a qual essa pessoa deve puxar a corda para que o homem suba (c) com velocidade constante e (d) com uma aceleração para cima de $1,30 \text{ m/s}^2$? Qual é o módulo da força que a polia exerce sobre o teto (e) no item a, (f) no item b, (g) no item c e (h) no item d?



Figura 5-53 Problema 58.

••59 Um macaco de 10 kg sobe em uma árvore por uma corda de massa desprezível que passa por um galho sem atrito e está presa na outra extremidade a um caixote de 15 kg, inicialmente em repouso no solo (Fig. 5-54). (a) Qual é o módulo da menor aceleração que o macaco deve ter para levantar o caixote? Se, após o caixote ter sido erguido, o macaco parar de subir e se agarra à corda, quais são (b) o módulo e (c) o sentido da aceleração do macaco e (d) a tensão da corda?

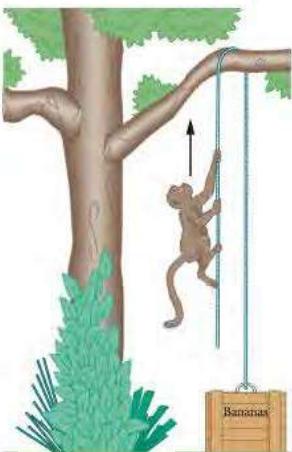


Figura 5-54 Problema 59.

••60 A Fig. 5-45 mostra um bloco de 5,00 kg sendo puxado em um piso sem atrito por uma corda que aplica uma força de módulo constante de 20,0 N e um ângulo $\theta(t)$ que varia com o tempo. Quando o ângulo θ chega a 25° , qual é a taxa de variação da aceleração do bloco se (a) $\theta(t) = (2,00 \times 10^{-2} \text{ graus/s})t$ e (b) $\theta(t) = -(2,00 \times 10^{-2} \text{ graus/s})t$? (Sugestão: Transforme os graus em radianos.)

••61 Um balão de ar quente de massa M desce verticalmente com uma aceleração para baixo de módulo a . Que massa (lastro) deve ser jogada para fora para que o balão tenha uma aceleração para cima de módulo a ? Suponha que a força vertical para cima do ar quente sobre o balão não muda com a perda de massa.

••62 No arremesso de peso, muitos atletas preferem lançar o peso com um ângulo menor que o ângulo teórico (cerca de 42°) para o qual a distância é máxima para um peso arremessado com a mesma velocidade e da mesma altura. Uma razão tem a ver com a velocidade que o atleta pode imprimir ao peso durante a fase de aceleração. Suponha que um peso de 7.260 kg é acelerado ao longo de uma trajetória reta com 1,650 m de comprimento por uma força constante de módulo 380,0 N, começando com uma velocidade de 2,500 m/s (devido ao movimento preparatório do atleta). Qual é a velocidade do peso no final da fase de aceleração se o ângulo entre a trajetória e a horizontal é (a) $30,00^\circ$ e (b) $42,00^\circ$? (Sugestão: trate o movimento como se fosse ao longo de uma rampa com o ângulo dado.) (c) Qual é a redução percentual da velocidade de lançamento se o atleta aumenta o ângulo de $30,00^\circ$ para $42,00^\circ$?

••63 A Fig. 5-55 mostra, em função do tempo, a componente F_x da força que age sobre um bloco de gelo de 3,0 kg que pode se deslocar apenas ao longo do eixo x . Em $t = 0$, o bloco está se movendo no sentido positivo do eixo, com uma velocidade de 3,0 m/s. Quais são (a) o módulo da velocidade do bloco e (b) o sentido do movimento do bloco no instante $t = 11 \text{ s}$?

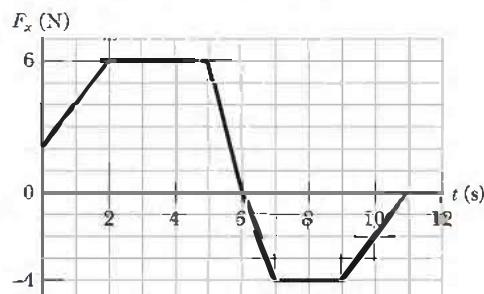


Figura 5-55 Problema 63.

••64 A Fig. 5-56 mostra uma caixa de massa $m_2 = 1,0 \text{ kg}$ sobre um plano inclinado sem atrito de ângulo $\theta = 30^\circ$. Ela está ligada por uma corda de massa desprezível a uma caixa de massa $m_1 = 3,0 \text{ kg}$ sobre uma superfície horizontal sem atrito. A polia não tem atrito e sua massa é desprezível. (a) Se o módulo da força horizontal \vec{F} é 2,3 N, qual é a tensão da corda? (b) Qual é o maior valor que o módulo de \vec{F} pode ter sem que a corda fique frouxa?

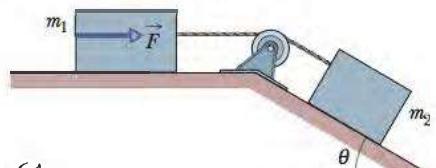


Figura 5-56 Problema 64.

••65 A Fig. 5-47 mostra uma máquina de Atwood, na qual dois recipientes estão ligados por uma corda (de massa desprezível) que

passa por uma polia sem atrito (também de massa desprezível). No instante $t = 0$, o recipiente 1 tem uma massa de 1,30 kg e o recipiente 2 tem uma massa de 2,80 kg, mas o recipiente 1 está perdendo massa (por causa de um vazamento) a uma taxa constante de 0,200 kg/s. Com que taxa o módulo da aceleração dos recipientes está variando (a) em $t = 0$ e (b) em $t = 3,00$ s? (c) Em que instante a aceleração atinge o valor máximo?

•••66 A Fig. 5-57 mostra parte de um teleférico. A massa máxima permitida de cada cabina com passageiros é 2800 kg. As cabinas, que estão penduradas em um cabo de sustentação, são puxadas por um segundo cabo ligado à torre de sustentação de cada cabina. Suponha que os cabos estão esticados e inclinados de um ângulo $\theta = 35^\circ$. Qual é a diferença entre as tensões de trechos contíguos do cabo que puxa as cabinas se elas estão com a máxima massa permitida e estão sendo aceleradas para cima a $0,81 \text{ m/s}^2$?



Figura 5-57 Problema 66.

•••67 A Fig. 5-58 mostra três blocos ligados por cordas que passam por polias sem atrito. O bloco B está sobre uma mesa sem atrito; as massas são $m_A = 6,00 \text{ kg}$, $m_B = 8,00 \text{ kg}$ e $m_C = 10,0 \text{ kg}$. Qual é a tensão da corda da direita quando os blocos são liberados?

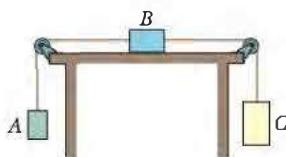


Figura 5-58 Problema 67.

•••68 Um arremessador de peso lança um peso de 7260 kg empurrando-o ao longo de uma linha reta com 1650 m de comprimento e um ângulo de $34,10^\circ$ com a horizontal, acelerando o peso até a velocidade de lançamento de $2,500 \text{ m/s}$ (que se deve ao movimento preparatório do atleta). O peso deixa a mão do arremessador a uma altura de $2,110 \text{ m}$ e com um ângulo de $34,10^\circ$ e percorre uma distância horizontal de $15,90 \text{ m}$. Qual é o módulo da força média que o atleta exerce sobre o peso durante a fase de aceleração? (Sugestão: trate o movimento durante a fase de aceleração como se fosse ao longo de uma rampa com o ângulo dado.)

Problemas Adicionais

69 Na Fig. 5-59, o bloco A de 4,0 kg e o bloco B de 6,0 kg estão conectados por uma corda de massa desprezível. A força $\vec{F}_A = (12 \text{ N})\hat{i}$ atua sobre o bloco A ; a força $\vec{F}_B = (24 \text{ N})\hat{i}$ atua sobre o bloco B . Qual é a tensão da corda?

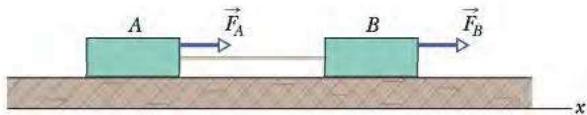


Figura 5-59 Problema 69.

70 Um homem de 80 kg salta para um pátio de concreto de uma janela a 0,50 m de altura. Ele não dobra os joelhos para amortecer o impacto e leva 2,0 cm para parar. (a) Qual é a aceleração média desde o instante em que os pés do homem tocam o solo até o instante em que o corpo se imobiliza? (b) Qual é o módulo da força média que o pátio exerce sobre o homem?

71 A Fig. 5-60 mostra uma caixa de dinheiro sujo (massa $m_1 = 3,0 \text{ kg}$) sobre um plano inclinado sem atrito de ângulo $\theta_1 = 30^\circ$. A caixa está ligada por uma corda de massa desprezível a uma caixa de dinheiro lavado (massa $m_2 = 2,0 \text{ kg}$) situada sobre um plano inclinado sem atrito de ângulo $\theta_2 = 60^\circ$. A polia não tem atrito e a massa é desprezível. Qual é a tensão da corda?

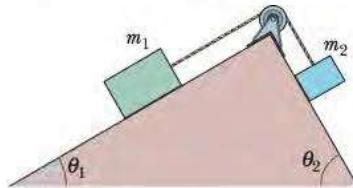


Figura 5-60 Problema 71.

72 Três forças atuam sobre uma partícula que se move com velocidade constante $\vec{v} = (2 \text{ m/s})\hat{i} - (7 \text{ m/s})\hat{j}$. Duas das forças são $\vec{F}_1 = (2 \text{ N})\hat{i} + (3 \text{ N})\hat{j} + (-2 \text{ N})\hat{k}$ e $\vec{F}_2 = (-5 \text{ N})\hat{i} + (8 \text{ N})\hat{j} + (-2 \text{ N})\hat{k}$. Qual é a terceira força?

73 Na Fig. 5-61, uma lata de antioxidantes ($m_1 = 1,0 \text{ kg}$) sobre um plano inclinado sem atrito está ligada a uma lata de apresuntado ($m_2 = 2,0 \text{ kg}$). A polia tem massa e atrito desprezíveis. Uma força vertical para cima de módulo $F = 6,0 \text{ N}$ atua sobre a lata de apresuntado, que tem uma aceleração para baixo de $5,5 \text{ m/s}^2$. Determine (a) a tensão da corda e (b) o ângulo β .

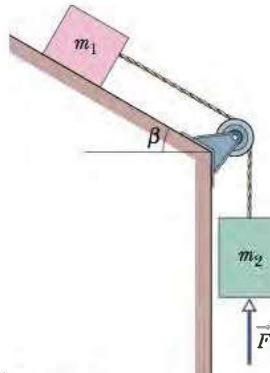


Figura 5-61 Problema 73.

74 As duas únicas forças que agem sobre um corpo têm módulos de 20 N e 35 N e direções que diferem de 80° . A aceleração resultante tem um módulo de 20 m/s^2 . Qual é a massa do corpo?

75 A Fig. 5-62 é uma vista superior de um pneu de 12 kg que está sendo puxado por três cordas horizontais. A força de uma das cordas ($F_1 = 50 \text{ N}$) está indicada. As outras duas forças devem ser orientadas de tal forma que o módulo da aceleração do pneu seja

o menor possível. Qual é o menor valor de α se (a) $F_2 = 30 \text{ N}$, $F_3 = 20 \text{ N}$; (b) $F_2 = 30 \text{ N}$, $F_3 = 10 \text{ N}$; (c) $F_2 = F_3 = 30 \text{ N}$?

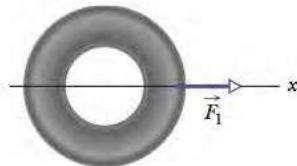


Figura 5-62 Problema 75.

76 Um bloco de massa M é puxado ao longo de uma superfície horizontal sem atrito por uma corda de massa m , como mostra a Fig. 5-63. Uma força horizontal \vec{F} age sobre uma das extremidades da corda. (a) Mostre que a corda deve ficar frouxa, mesmo que imperceptivelmente. Supondo que a curvatura da corda seja desprezível, determine (b) a aceleração da corda e do bloco, (c) a força da corda sobre o bloco e (d) a tensão no ponto médio da corda.

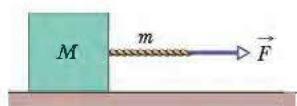


Figura 5-63 Problema 76.

77 Um operário arrasta um caixote no piso de uma fábrica puxando-o por uma corda. O operário exerce uma força de módulo $F = 450 \text{ N}$ sobre a corda, que está inclinada de um ângulo $\theta = 38^\circ$ em relação à horizontal, e o chão exerce uma força horizontal de módulo $f = 125 \text{ N}$ que se opõe ao movimento. Calcule o módulo da aceleração do caixote (a) se a massa do caixote é 310 kg e (b) se o peso do caixote é 310 N .

78 Na Fig. 5-64, uma força \vec{F} de módulo 12 N é aplicada a uma caixa de massa $m_2 = 1,0 \text{ kg}$. A força é dirigida para cima paralelamente a um plano inclinado de ângulo $\theta = 37^\circ$. A caixa está ligada por uma corda a outra caixa de massa $m_1 = 3,0 \text{ kg}$ situada sobre o piso. O plano inclinado, o piso e a polia não têm atrito e as massas da polia e da corda são desprezíveis. Qual é a tensão da corda?

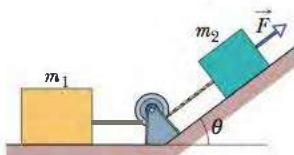


Figura 5-64 Problema 78.

79 Uma certa partícula tem um peso de 22 N em um local onde $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Quais são (a) o peso e (b) a massa da partícula em um local onde $g = 4,9 \text{ m/s}^2$? Quais são (c) o peso e (d) a massa da partícula se a ela é deslocada para um ponto do espaço sideral onde $g = 0$?

80 Uma pessoa de 80 kg salta de paraquedas e experimenta uma aceleração para baixo de $2,5 \text{ m/s}^2$. A massa do paraquedas é $5,0 \text{ kg}$. (a) Qual é a força para cima que o ar exerce sobre o paraquedas? (b) Qual é a força que a pessoa exerce sobre o paraquedas?

81 Uma espaçonave decola verticalmente da Lua, onde $g = 1,6 \text{ m/s}^2$. Se a nave tem uma aceleração vertical para cima de $1,0 \text{ m/s}^2$ no instante da decolagem, qual é o módulo da força exercida pela nave sobre o piloto, que pesa 735 N na Terra?

82 Na vista superior da Fig. 5-65, cinco forças puxam uma caixa de massa $m = 4,0 \text{ kg}$. Os módulos das forças são $F_1 = 11 \text{ N}$, $F_2 = 17 \text{ N}$, $F_3 = 3,0 \text{ N}$, $F_4 = 14 \text{ N}$ e $F_5 = 5,0 \text{ N}$; o ângulo θ_4 é 30° . De-

termine a aceleração da caixa (a) em termos dos vetores unitários e como (b) um módulo e (c) um ângulo em relação ao sentido positivo do eixo x .

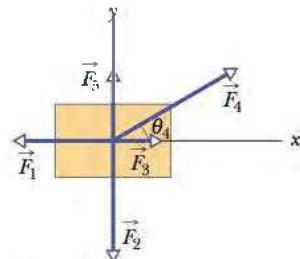


Figura 5-65 Problema 82.

83 Uma certa força imprime a um objeto de massa m_1 uma aceleração de $12,0 \text{ m/s}^2$ e a um objeto de massa m_2 uma aceleração de $3,30 \text{ m/s}^2$. Que aceleração essa mesma força imprimiria a um objeto de massa (a) $m_2 - m_1$ e (b) $m_2 + m_1$?

84 Você puxa um pequeno refrigerador com uma força constante \vec{F} em um piso encerado (sem atrito), com \vec{F} na horizontal (caso 1) ou com \vec{F} inclinada para cima de um ângulo θ (caso 2). (a) Qual é a razão entre a velocidade do refrigerador no caso 2 e a velocidade no caso 1 se você puxa o refrigerador por um certo tempo t ? (b) Qual é essa razão se você puxa o refrigerador ao longo de uma certa distância d ?

85 Um artista de circo de 52 kg deve descer escorregando por uma corda que arrebentará se a tensão exceder 425 N . (a) O que acontece se o artista fica imóvel pendurado na corda? (b) Para que módulo de aceleração a corda está prestes a arrebentar?

86 Calcule o peso de um astronauta de 75 kg (a) na Terra, (b) em Marte, onde $g = 3,7 \text{ m/s}^2$, e (c) no espaço sideral, onde $g = 0$. (d) Qual é a massa do astronauta em cada um desses lugares?

87 Um objeto está pendurado em uma balança de mola presa ao teto de um elevador. A balança indica 65 N quando o elevador está parado. Qual é a leitura da balança quando o elevador está subindo (a) com uma velocidade constante de $7,6 \text{ m/s}$ e (b) com uma velocidade de $7,6 \text{ m/s}$ e uma desaceleração de $2,4 \text{ m/s}^2$?

88 Imagine uma espaçonave prestes a aterrissar na superfície de Calisto, uma das luas de Júpiter. Se o motor fornece uma força para cima (empuxo) de 3260 N , a espaçonave desce com velocidade constante; se o motor fornece apenas 2200 N , a espaçonave desce com uma aceleração de $0,39 \text{ m/s}^2$. (a) Qual é o peso da espaçonave nas vizinhanças da superfície de Calisto? (b) Qual é a massa da aeronave? (c) Qual é o módulo da aceleração em queda livre próximo à superfície de Calisto?

89 Uma turbina a jato de 1400 kg é presa à fuselagem de um avião comercial por apenas três parafusos (esta é a prática comum). Suponha que cada parafuso suporte um terço da carga. (a) Calcule a força a que cada parafuso é submetido enquanto o avião está parado na pista, aguardando permissão para decolar. (b) Durante o voo, o avião encontra uma turbulência que provoca uma aceleração brusca para cima de $2,6 \text{ m/s}^2$. Calcule a força a que é submetido cada parafuso durante essa aceleração.

90 Uma nave interestelar tem uma massa de $1,20 \times 10^6 \text{ kg}$ e está inicialmente em repouso em relação a um sistema estrelar. (a) Que aceleração constante é necessária para levar a nave até a velocidade de $0,10c$ (onde $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ é a velocidade da luz) em relação ao sistema estrelar em $3,0$ dias? (b) Qual é o valor dessa aceleração em unidades de g ? (c) Que força é necessária para essa aceleração?

(d) Se os motores são desligados quando a velocidade de $0,10c$ é atingida (fazendo com que a velocidade permaneça constante desse momento em diante), quanto tempo leva a nave (a partir do instante inicial) para viajar 5,0 meses-luz, a distância percorrida pela luz em 5,0 meses?

91 Uma motocicleta e seu piloto de 60,0 kg aceleraram a $3,0 \text{ m/s}^2$ para subir uma rampa inclinada de 10° em relação à horizontal. Quais são os módulos (a) da força resultante a que é submetido o piloto e (b) da força que a motocicleta exerce sobre o piloto?

92 Calcule a aceleração inicial para cima de um foguete de massa $1,3 \times 10^4 \text{ kg}$ se a força inicial para cima produzida pelos motores (empuxo) é $2,6 \times 10^5 \text{ N}$. Não despreze a força gravitacional a que o foguete está submetido.

93 A Fig. 5-66a mostra um móbil pendurado no teto; ele é composto por duas peças de metal ($m_1 = 3,5 \text{ kg}$ e $m_2 = 4,5 \text{ kg}$) ligadas por cordas de massa desprezível. Qual é a tensão (a) da corda de baixo e (b) da corda de cima? A Fig. 5-66b mostra um móbil composto de três peças metálicas. Duas das massas são $m_3 = 4,8 \text{ kg}$ e $m_5 = 5,5 \text{ kg}$. A tensão da corda de cima é 199 N. Qual é a tensão (c) da corda de baixo e (d) da corda do meio?

94 Por esporte, um tatu de 12 kg escorrega em um grande lago gelado, plano e sem atrito. A velocidade inicial do tatu é $5,0 \text{ m/s}$ no sentido positivo do eixo x . Considere a posição inicial do tatu sobre o gelo como a origem. O animal escorrega sobre o gelo ao mesmo tempo em que é empurrado pelo vento com uma força de 17 N no sentido positivo do eixo y . Em termos dos vetores unitários, quais são (a) o vetor velocidade e (b) o vetor posição do tatu depois de deslizar por 3,0 s?

95 Suponha que na Fig. 5-12 as massas dos blocos sejam $2,0 \text{ kg}$ e $4,0 \text{ kg}$. (a) Qual dessas massas deve ser a do bloco pendurado para que a aceleração seja a maior possível? Quais são nesse caso (b) o módulo da aceleração e (c) a tensão da corda?

96 Para capturar um nêutron livre, um núcleo deve fazê-lo parar em uma distância menor que o diâmetro do núcleo através da *interação forte*, a força responsável pela estabilidade dos núcleos atômicos, que é praticamente nula fora do núcleo. Suponha que, para ser capturado por um núcleo com um diâmetro $d = 1,0 \times 10^{-14} \text{ m}$, um nêutron livre deva ter uma velocidade inicial menor ou igual a $1,4 \times 10^7 \text{ m/s}$. Supondo que a força a que está sujeito o nêutron no interior do núcleo é constante, determine o módulo da interação forte. A massa do nêutron é $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

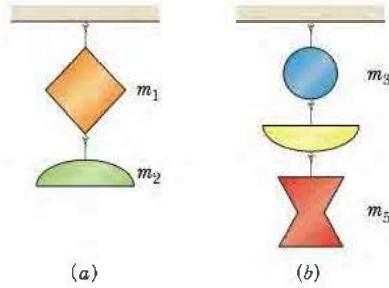


Figura 5-66 Problema 93.

(a)

(b)