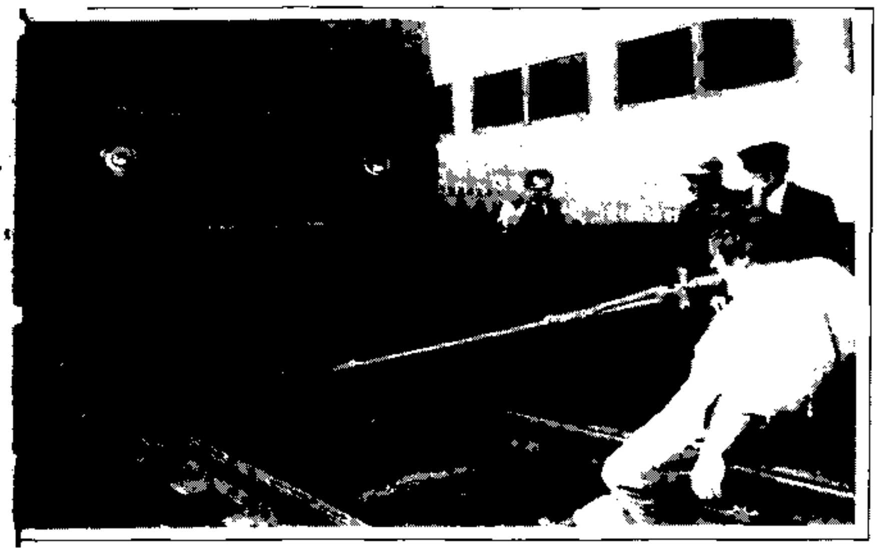
FORÇA E MOVIMENTO - I

5



Em 4 de abril de 1974, John Massis, da Bélgica, conseguiu movimentar dois vagões de passageiros pertencentes à ferrovia Long Island, de Nova Iorque. Ele prendeu com seus dentes um aro que estava atado a um dos vagões por uma corda, e depois inclinou-se para trás, enquanto pressionava seus pés contra os dormentes dos trilhos. Os vagões pesavam cerca de 80 ton. Massis teve de usar força sobre-humana para conseguir puxá-los? Responderemos esta pergunta brevemente.

5-1 Por Que a Velocidade de uma Partícula Varia?

Algumas vezes, o objeto que estamos observando — por exemplo, um automóvel, uma bola, um gato — pode variar sua velocidade. Pode acelerar. A observação nos tem mostrado que, quando isso acontece, podemos encontrar um ou mais objetos nas proximidades que parecem estar associados com essa variação. Relacionamos a aceleração de uma partícula pela interação entre ela e sua vizinhança. Estamos tão acostumados a isso que, quando percebemos um objeto variar sua velocidade, sem causa aparente, suspeitamos de um truque. Se uma bola, ao rolar, muda sua direção de repente, suspeitamos que há um ímã ou um jato de ar escondido.

Nosso problema principal neste capítulo é: (1) Estamos lidando com uma partícula (daqui em diante referida como *corpo*) cujas características conhecemos (por exemplo, massa, forma, volume, carga elétrica). (2) Também conhecemos a localização e as propriedades de todos os objetos de interesse nas proximidades. Isto é, sabemos tudo acerca do meio onde se situa o corpo. (3) Queremos saber como o corpo se moverá.

Isaac Newton (1642-1727), ao propor suas leis do movimento e sua teoria gravitacional, foi o primeiro a solucionar o problema que acabamos de colocar. Nosso plano para dar prosseguimento ao assunto é: (1) Introduzir o conceito de **força** (empurrar ou puxar), em termos da aceleração fornecida a um corpo-padrão selecionado. (2) Definir **massa** e mostrar como atribuir uma determinada massa a um corpo, para que possamos entender como diferentes corpos têm acelerações diferentes na mesma vizinhança. (3) Encontrar uma maneira de calcular a força que atua em um corpo a partir das propriedades desse corpo e da vizinhança em que se situa. Isto é, descobrir as **leis de força**. (4) Mostrar como várias forças atuantes em um corpo podem ser combinadas numa **força resultante**.

A Fig. 5-1 mostra as relações entre essas grandezas, cujo estudo constitui a **mecânica**. A força aparece tanto nas leis de força (que nos informam como calcular a força que atua

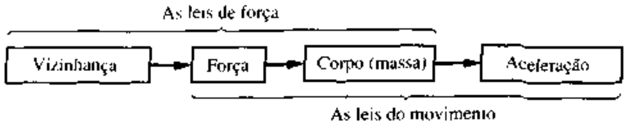


Fig. 5-1 As relações da mecânica. Os três blocos da esquerda propõem que a força é uma interação entre um corpo e sua vizinhança. Os três blocos da direita propõem que a força aplicada a um corpo causará uma aceleração nesse corpo.

em um corpo, numa determinada vizinhança), como nas leis do movimento (que nos informam qual a aceleração a que um corpo está submetido, quando uma força atua sobre ele). Esta é a maior glória da mecânica newtoniana, que consegue predizer resultados concordantes com os experimentos num grande número de fenômenos.

Há alguns problemas importantes para os quais a mecânica newtoniana não fornece resultados corretos. Como discutido no Cap. 4, se as velocidades das partículas envolvidas forem próximas da velocidade da luz, devemos abandonar a mecânica newtoniana e aplicar a teoria da relatividade especial de Einstein. Para problemas na escala atômica (por exemplo, o movimento dos elétrons dentro do átomo), devemos abandonar a mecânica newtoniana e aplicar a mecânica quântica. Atualmente, os físicos consideram a mecânica newtoniana como um caso especial dessas duas teorias mais amplas. Entretanto, é um caso especial muito importante, porque compreende o movimento de objetos que vão desde moléculas até galáxias. E é altamente precisa nessa ampla faixa de fenômenos, como nos mostram as manobras bem-sucedidas das sondas espaciais.

5-2 Primeira Lei de Newton

Antes de Newton formular suas leis da mecânica, pensava-se que era necessária alguma influência ou "força" para manter um corpo em movimento com velocidade constante. Julgava-se que um corpo em repouso estivesse em seu "estado natural". De forma análoga, para que o corpo se movesse com velocidade constante, seria necessário que, de alguma forma, fosse impulsionado, caso contrário, ele pararia "naturalmente".

Isso não deixa de ser razoável. Se fizermos um livro deslizar sobre um carpete, ele com certeza irá parar. Para fazê-lo se mover sobre o carpete com velocidade constante, podemos, por exemplo, amarrá-lo a um cordão e puxá-lo.

Entretanto, se fizermos o livro deslizar sobre a superfície de gelo de um rinque de patinação, ele alcançará uma distância bem maior. Podemos imaginar outras superfícies, maiores e mais lisas, sobre as quais o livro poderia deslizar cada vez mais. Num caso extremo, poderíamos pensar numa superfície muito grande e extremamente lisa (ou seja, uma **superfície sem atrito**) na qual o livro não diminuísse sua velocidade. Num laboratório, podemos chegar bem próximo dessa condição, fazendo o livro deslizar em uma mesa de ar horizontal, sobre a qual ele se move numa fina camada de ar.

Acabamos por concluir que *não* precisamos de uma força para manter um corpo em movimento com velocidade constante. Isso concorda plenamente com o que discutimos na Seção 4-8 em relação aos referenciais: um corpo em repouso num referencial pode estar se movendo com velocidade constante em relação a outro referencial. Então, *repouso* e *movimento com velocidade constante* não são, de forma alguma, diferentes. Isto nos leva à primeira das três leis de Newton sobre o movimento:

PRIMEIRA LEI DE NEWTON: Considere um corpo sobre o qual não atue força resultante alguma. Se o corpo está em repouso, ele permanece em repouso. Se o corpo está em movimento com velocidade constante, ele permanecerá assim indefinidamente.

A primeira lei de Newton é de fato uma afirmação sobre referenciais, pois ela define os tipos de referenciais nos quais as leis da mecânica newtoniana são válidas. Desse ponto de vista, a primeira lei pode ser expressa como:

PRIMEIRA LEI DE NEWTON: Se a força resultante sobre um corpo é nula, é possível encontrar referenciais nos quais aquele corpo não tenha aceleração

A primeira lei de Newton também é conhecida como *lei da inércia* e os referenciais que ela define são chamados *referenciais inerciais*.

A Fig. 5-2 mostra como podemos avaliar um determinado referencial para ver se ele é ou não inercial. Com o vagão em repouso, marque a posição do pêndulo parado sobre a mesa. Com o vagão em movimento, o pêndulo *somente* permanece sobre a marca, se o vagão estiver se movendo em linha reta com velocidade constante. Se o vagão estiver aumentando ou diminuindo a velocidade ou estiver fazendo uma curva, o pêndulo se desloca da marca e o vagão é um referencial não-inercial.

Se colocarmos uma bola de boliche parada sobre um carrossel infantil em movimento, nenhuma força parecerá atuar na bola, mas ela não permanecerá em repouso. Se rolarmos a bola radialmente para fora, ela se desviará dessa direção. Referenciais girantes *não* são referenciais inerciais. Rigorosamente falando, a Terra não é um referencial inercial, por causa da sua rotação. Todavia, exceto para os

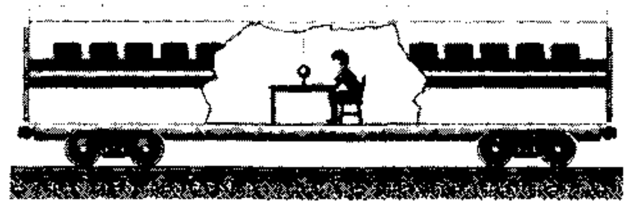


Fig. 5-2 Teste para verificar se um vagão de trem é ou não um referencial inercial.

movimentos em grande escala como as correntes de vento e as correntes oceânicas, podemos admitir que a Terra seja, aproximadamente, um referencial inercial. Daqui em diante, exceto quando especificado o contrário, faremos essa aproximação.*

5-3 Força

Agora, vamos definir **força** com mais precisão, em termos da aceleração fornecida a um corpo-padrão de referência. Vamos usar, ou melhor, vamos imaginar o quilograma-padrão da Fig. 1-7 como o corpo-padrão. A este corpo foi atribuído, exatamente e por definição, a massa de 1 kg. Mostraremos depois como atribuir massas a outros corpos.

Vamos colocar esse corpo sobre uma mesa horizontal, sem atrito, e puxá-lo para a direita (Fig. 5-3) de maneira que, por tentativa, ele adquira uma aceleração de 1 m/s^2. Por definição, dizemos, então, que estamos exercendo sobre o corpo uma força de 1 newton (abreviado por N).

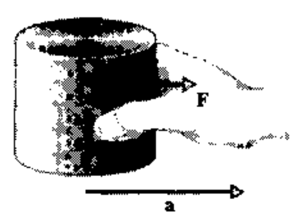


Fig. 5-3 A força **F** sobre um corpo padrão causa uma aceleração **a** nesse corpo.

Podemos exercer, sobre esse corpo, uma força de 2 N, puxando-o de forma a submetê-lo a uma aceleração de 2 m/s^2, e assim por diante. Em geral, observamos que se um corpo está submetido a uma aceleração a, existe uma força F (em newtons) atuante nele com módulo igual ao da aceleração (em m/s^2).

A aceleração é um vetor. E a força é um vetor? Podemos, facilmente, atribuir à força a mesma direção e o mesmo sentido da aceleração produzidos por essa força sobre o corpo-padrão. Isso, entretanto, não é suficiente para provar que a força é um vetor. Temos que mostrar que a força também obedece às leis da adição vetorial, e só experimentalmente podemos saber se, de fato, ela obedece a essas leis.

Vamos fazer com que o corpo-padrão seja submetido a uma força de 4 N ao longo do eixo x e a uma força de 3 N ao longo do eixo y; suponhamos que esses eixos estejam no plano horizontal da superfície de uma mesa sem atrito. A primeira dessas forças, se atuar sozinha sobre o corpo, produzirá uma aceleração de 4 m/s^2 ao longo do eixo x. A segunda, de forma idêntica, produzirá uma aceleração de 3 m/s^2 ao longo do eixo y.

* A característica não-inercial da Terra é revelada quando se observa que um corpo em queda livre não cai em linha reta, mas sofre um pequeno desvio para leste. Na latitude 45°, por exemplo, um corpo que cair da altura de 50 m (desprezando a resistência do ar) alcançará o solo 5 mm a leste da vertical que ele seguiria, se não houvesse a rotação da Terra.

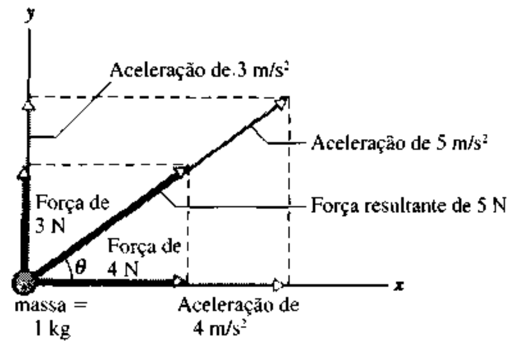


Fig. 5-4 Uma força de 3 N e outra de 4 N aplicadas, simultaneamente, ao corpo padrão, que tem massa exatamente igual a 1 kg. A aceleração do corpo é a mesma que ele teria, se uma única força, igual à soma vetorial das forças, fosse aplicada sobre ele. As forças se somam como vetores.

E se as forças atuarem simultaneamente, como na Fig. 5-4? Poderíamos determinar experimentalmente (e só experimentalmente) que a aceleração sobre o corpo seria de 5 m/s^2, na direção mostrada na Fig. 5-4. Essa é exatamente a aceleração que encontraríamos, se o corpo estivesse sob a ação de uma única força igual à soma vetorial (ou *resultante*) das duas forças que atuam nele. Esse vetor soma, de módulo igual a 5 N, direção e sentido indicados na Fig. 5-4, é a força resultante. Experiências desse tipo mostram, com certeza, que as forças são vetores. Elas possuem módulo, direção e sentido, e obedecem às regras da adição vetorial. Daqui em diante, vamos simbolizar uma força por uma letra em negrito, na maioria das vezes, a letra **F**.

5-4 Massa

A experiência diária nos mostra que uma mesma força produz diferentes acelerações em diferentes corpos. Imagine uma bola de beisebol e uma bola de boliche sobre um plano, e que cada uma receba a mesma pancada inicial; a aceleração da bola de beisebol será muito maior que a de boliche. A diferença entre as duas acelerações é causada pela diferença de massa entre as duas bolas. Mas o que vem a ser massa, exatamente?

Para uma definição quantitativa, vamos fixar uma mola ao corpo-padrão, conforme ilustra a Fig. 5-5, e vamos submetê-lo a uma aceleração $a_0 = 1$ m/s^2. A força que exercemos na mola e que esta transmite ao corpo é igual a 1 N. Registramos, cuidadosamente, o alongamento ΔL da mola, devido a essa força de 1 N. Então, por definição, a massa m_0 do corpo-padrão é exatamente 1 kg.

Agora, vamos substituir o corpo-padrão por um corpo X qualquer e vamos aplicar a este corpo a mesma força de 1 N. De forma análoga ao que foi feito para o corpo-padrão, vamos puxar esse corpo X utilizando mola distendida do mesmo comprimento ΔL. Suponha que a aceleração a_X do corpo X venha a ser 0,25 m/s^2. Considerando este resultado experimental, podemos atribuir ao corpo X a massa m_X, e já que uma mesma força produz acelerações

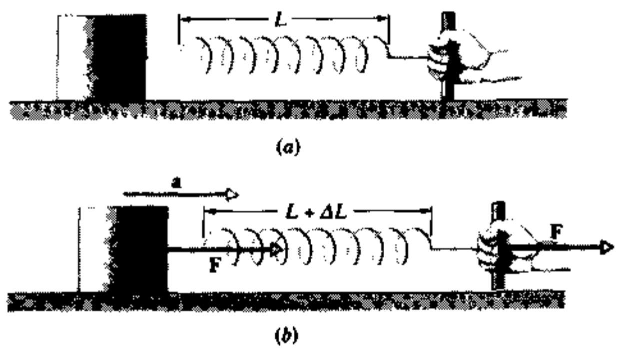


Fig. 5-5 *(a)* Mola de comprimento *L* é fixada a um corpo padrão de massa igual a 1 kg. *(b)* Uma aceleração **a** é aplicada ao corpo padrão, quando puxamos aquela mola com uma força **F** que causa uma variação ΔL no seu comprimento. O atrito na superfície é nulo.

diferentes em corpos diferentes, podemos definir a razão entre as massas como sendo inversamente proporcional à razão entre as suas acelerações. Logo,

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

ou

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

Assim, o corpo *X* que está submetido a somente um quarto da aceleração do corpo-padrão, quando a mesma força é aplicada sobre ele, tem, por esta definição, o quádruplo da massa daquele corpo.

Dessa maneira, podemos atribuir massas a quaisquer corpos diferentes do corpo-padrão. Entretanto, antes de aceitarmos essa metodologia, vamos verificá-la de duas diferentes maneiras.

O Primeiro Teste

Vamos repetir a comparação com o corpo-padrão, mas aplicando agora uma outra força a ambos os corpos. Suponha, por exemplo, que estiquemos mais ainda a mola, de forma que a aceleração a'_0 do corpo-padrão seja 5 m/s². Isto é, usamos uma força de 5 N, em vez de uma de 1 N, para comparar as massas.

Vamos observar que, se aplicarmos ao corpo *X* essa mesma força de 5 N, a aceleração a'_X é 1,25 m/s². Então, determinamos a massa do corpo *X* como

$$m_X = m_0 \frac{a'_0}{a'_X} = (1 \text{ kg}) \frac{5 \text{ m/s}^2}{1{,}25 \text{ m/s}^2} = 4 \text{ kg},$$

exatamente como antes.

O Segundo Teste

Considere que — usando ainda o método da mola — na comparação de um segundo corpo, o corpo *Y*, com o corpo-padrão, tenhamos encontrado $m_Y = 6$ kg. Agora, vamos comparar o corpo *X* e o corpo *Y* diretamente. Isto é, aplicamos uma força **F** (de qualquer intensidade conveniente) a cada um deles e, depois, medimos as acelerações resultantes a''_X e a''_Y. Digamos que as acelerações encontradas tenham sido $a''_X = 2{,}4$ m/s² e $a''_Y = 1{,}6$ m/s².

Vamos, agora, determinar a massa do corpo *Y* comparando-o diretamente com o corpo *X*, cuja massa já conhecemos, ao invés de compará-lo com o corpo-padrão. Encontramos

$$m_Y = m_X \frac{a''_X}{a''_Y} = (4 \text{ kg}) \frac{2{,}4 \text{ m/s}^2}{1{,}6 \text{ m/s}^2} = 6 \text{ kg},$$

que é o mesmo resultado da comparação com o corpo-padrão.

O Que é Massa?

Vimos que nosso método de atribuir massa a um corpo arbitrariamente apresenta resultados consistentes, independente da força aplicada e do corpo utilizado para comparação com o corpo-padrão. Na verdade, a massa parece ser uma característica intrínseca de um corpo.

Como a palavra *massa* é usada diariamente, deveríamos ter um conhecimento intuitivo dela, talvez algo que pudéssemos sentir fisicamente. Será que ela se refere ao tamanho do corpo, ao seu peso ou à sua densidade? A resposta é não, embora essas características sejam, algumas vezes, confundidas com a massa. *A **massa** de um corpo é a característica que relaciona a força a ele aplicada com a aceleração resultante.* Não existe uma definição mais familiar do que esta para massa; e a única ocasião em que percebemos fisicamente a massa é quando tentamos acelerar um corpo. Se, por exemplo, empurrarmos primeiro a bola de beisebol e em seguida a bola de boliche, vamos notar que elas têm massas diferentes.

5-5 Segunda Lei de Newton

Todas as definições, experiências e observações até aqui descritas podem ser resumidas, graças a Newton, numa simples equação vetorial, que é conhecida como a segunda lei de Newton para o movimento:

$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad \text{(segunda lei de Newton).} \qquad (5\text{-}1)$$

Ao usarmos a Eq. 5-1, devemos estar bem certos sobre o corpo no qual as forças estão sendo aplicadas. Assim, $\sum\mathbf{F}$ na Eq. 5-1 é a soma *vetorial*, ou a **força resultante**, de *todas* as forças que *atuam* naquele corpo. Se esquecermos alguma força (ou computarmos duas vezes alguma delas), chegaremos a um resultado falso. Somente as forças que *atuam* no corpo são consideradas. Num determinado problema, várias forças podem estar envolvidas, mas devemos computar somente aquelas que atuam no corpo em questão. Finalmente, $\sum\mathbf{F}$ inclui somente forças *externas*, isto é,

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

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

[a] 1 lb = 1 slug · ft/s^2.

forças exercidas sobre o corpo por outros corpos. Não incluímos as forças internas, resultantes da interação mútua entre partes do próprio corpo.

Na resolução de problemas pela Eq. 5-1, freqüentemente desenhamos um **diagrama de corpo isolado**. Neste diagrama, o corpo é representado por um ponto e cada força externa (ou a força resultante $\sum \mathbf{F}$) que atua no corpo é representada por um vetor com origem nesse ponto.

Como qualquer equação vetorial, a Eq. 5-1 é equivalente a três equações escalares:

$$\sum F_x = ma_x, \quad \sum F_y = ma_y, \quad \sum F_z = ma_z. \qquad (5\text{-}2)$$

Essas equações relacionam as três componentes da força resultante sobre um corpo com as três componentes da aceleração desse corpo.

Finalmente, observamos que a primeira lei de Newton é um caso especial da segunda lei. Isto é, se nenhuma força atua no corpo, a sua aceleração é nula, conforme mostra a Eq. 5-1. Isso, no entanto, não torna menos importante a primeira lei de Newton; seu papel na definição dos referenciais inerciais, na qual a mecânica se apóia, justifica seu enunciado como uma lei independente.

Da Eq. 5-2, encontramos, em unidades SI,

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

que concorda com a discussão da Seção 5-3. Embora daqui em diante passemos a usar, quase que exclusivamente, o sistema de unidades SI, outros sistemas ainda estão em uso. Entre estes, os principais são o Sistema Britânico e o Sistema CGS (centímetro-grama-segundo). A Tabela 5-1 mostra as unidades nas quais as Eqs. 5-1 e 5-2 podem ser expressas. (Veja também o Apêndice F.)

EXEMPLO 5-1 Um homem empurra um trenó, carregado com massa $m = 240$ kg, por uma distância $d = 2{,}3$ m, sobre a superfície sem atrito de um lago gelado. Ele exerce sobre o trenó uma força horizontal constante **F**, com módulo $F = 130$ N (veja Fig. 5-6*a*). Se o veículo parte do repouso, qual a sua velocidade final?

Solução A Fig. 5-6*b* mostra um diagrama de corpo isolado para essa situação. Traçamos um eixo horizontal x, arbitrando o sentido positivo para a direita e tratamos o trenó como uma partícula representada por um ponto. Supomos que a componente F_x da força **F** exercida pelo homem seja a única força horizontal atuante no veículo. Então, pela segunda lei de Newton, podemos achar o módulo da aceleração a_x do trenó:

$$a_x = \frac{F_x}{m} = \frac{130\ \mathrm{N}}{240\ \mathrm{kg}} = 0{,}542\ \mathrm{m/s^2}.$$

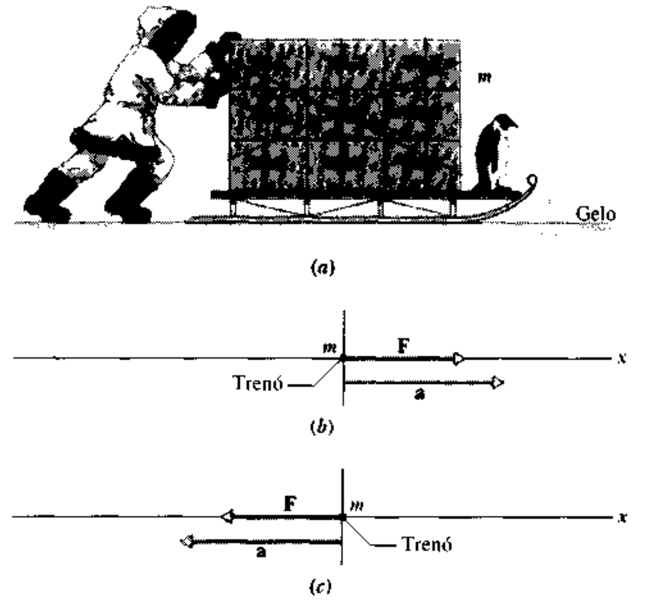


Fig. 5-6 Exemplo 5-1. (*a*) Um homem empurra um trenó carregado sobre uma superfície sem atrito. (*b*) Um "diagrama de corpo isolado" mostrando a força resultante aplicada sobre o trenó e a aceleração que ela produz. (*c*) Um diagrama de corpo isolado para o Exemplo 5-2. O homem agora empurra no sentido oposto, revertendo a aceleração.

Como a aceleração é constante, podemos usar a Eq. 2-14, $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$ para calcular a velocidade final. Fazendo $v_0 = 0$ e $x - x_0 = d$, e identificando a_x com a, calculamos v:

$$v = \sqrt{2ad}$$
$$= \sqrt{(2)(0{,}542\ \mathrm{m/s^2})(2{,}3\ \mathrm{m})} = 1{,}6\ \mathrm{m/s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

A força, a aceleração, o deslocamento e a velocidade final do trenó carregado são todos positivos, o que significa que eles apontam para a direita, na Fig. 5-6*b*.

EXEMPLO 5-2 O homem do Exemplo 5-1 quer reverter o sentido da velocidade do trenó carregado em 4,5 s. Com que força constante ele deve empurrá-lo para conseguir isso?

Solução Usando a Eq. 2-9, $v = v_0 + at$, vamos achar primeiro a aceleração constante necessária para reverter a velocidade do veículo em 4,5 s. Explicitando para a, temos

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{(-1{,}6\ \mathrm{m/s}) - (1{,}6\ \mathrm{m/s})}{4{,}5\ \mathrm{s}}$$
$$= -0{,}711\ \mathrm{m/s^2}.$$

Em módulo, essa aceleração é maior do que a do Exemplo 5-1 ($0{,}542\ \mathrm{m/s^2}$), logo, o homem dessa vez deve utilizar uma força bem maior para empurrar o trenó. Da Eq. 5-2, fazendo $a_x = a$, podemos calcular essa força:

$$F_x = ma_x = (240\ \mathrm{kg})(-0{,}711\ \mathrm{m/s^2})$$
$$= -171\ \mathrm{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

O sinal menos significa que o homem está empurrando o trenó no sentido negativo de x, isto é, para a esquerda, no diagrama de corpo isolado da Fig. 5-6*c*.

EXEMPLO 5-3 Um caixote de massa $m = 360$ kg está parado sobre a carroceria de um caminhão que se move com uma velocidade $v_0 = 120$ km/h, conforme mostrado na Fig. 5-7*a*. O motorista freia e diminui a velocidade para $v = 62$ km/h em 17 s. Qual a força (suposta constante) so-

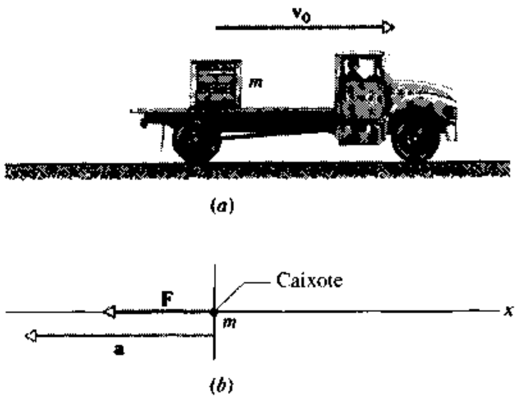


Fig. 5-7 Exemplo 5-3. (*a*) Um caixote sobre um caminhão que está diminuindo a velocidade. (*b*) O diagrama de corpo isolado do caixote. A força **F** produz uma aceleração (ou desaceleração) **a** no caixote.

bre o caixote, durante esse intervalo de tempo? Suponha que o caixote não deslize sobre a carroceria do caminhão.

Solução Vamos determinar primeiro a aceleração do caixote, que é constante, usando a Eq. $v = v_0 + at$:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{(62\ \text{km/h}) - (120\ \text{km/h})}{17\ \text{s}}$$
$$= \left(-3{,}41\ \frac{\text{km}}{\text{h}\cdot\text{s}}\right)\left(\frac{1\ \text{h}}{3600\ \text{s}}\right)\left(\frac{1000\ \text{m}}{1\ \text{km}}\right)$$
$$= -0{,}947\ \text{m/s}^2.$$

Como mostra a Fig. 5-7 o vetor velocidade do caixote aponta para a direita e seu vetor aceleração aponta para a esquerda.

A força sobre o caixote é obtida usando a segunda lei de Newton:

$$F = ma$$
$$= (360\ \text{kg})(-0{,}947\ \text{m/s}^2)$$
$$= -340\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Essa força, que poderia ser exercida por tirantes para manter preso o caixote, atua no mesmo sentido da aceleração, ou seja, para a esquerda, na Fig. 5-7*b*.

EXEMPLO 5-4 Numa brincadeira de cabo-de-guerra, Alex, Bete e Charles puxam um pneu de automóvel, nas direções mostradas na Fig. 5-8*a*, vista do alto. Alex puxa com uma força F_A (220 N) e Charles com uma força F_C (170 N). Qual a força F_B aplicada por Bete? O pneu permanece parado e o sentido da força de Charles não está indicado.

Solução A Fig. 5-8*b* mostra o diagrama de corpo isolado do pneu. A aceleração do pneu é zero, porque, da Eq. 5-1, a força resultante sobre o pneu também deve ser zero. Isto é,

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_A + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_C = 0.$$

Essa equação vetorial é equivalente às duas equações escalares

$$\sum F_x = F_C \cos\phi - F_A \cos 47{,}0° = 0 \qquad (5\text{-}4)$$

e

$$\sum F_y = F_C \operatorname{sen}\phi + F_A \operatorname{sen} 47{,}0° - F_B = 0. \qquad (5\text{-}5)$$

Os sinais dos termos das Eqs. 5-4 e 5-5 indicam os sentidos das componentes das respectivas forças, na Fig. 5-8*b*. Substituindo os valores conhecidos, temos, pela Eq. 5-4,

$$(170\ \text{N})(\cos\phi) = (220\ \text{N})(\cos 47{,}0°)$$

ou

$$\phi = \cos^{-1}\frac{(220\ \text{N})(0{,}682)}{170\ \text{N}} = 28{,}0°.$$

Substituindo na Eq. 5-5, temos

$$F_B = F_C \operatorname{sen}\phi + F_A \operatorname{sen} 47{,}0°$$
$$= (170\ \text{N})(\operatorname{sen} 28{,}0°) + (220\ \text{N})(\operatorname{sen} 47{,}0°)$$
$$= 241\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Certifique-se de que os três vetores da Fig. 5-8*b*, se convenientemente deslocados, formam um triângulo. Ou seja, sua soma é nula.

Resolução de Problemas

Tática 1: Leia o Problema com Atenção

Leia o enunciado do problema várias vezes até ter um quadro bem definido da situação, observe quais os dados fornecidos e quais os pedidos. Nos Exemplos 5-1 e 5-2, você deve refletir assim: "Alguém está empurrando um trenó. Se a velocidade deste varia, então há uma aceleração envolvida. O movimento é retilíneo. No exemplo, é dada uma força e pedida a outra. Logo, a situação requer que apliquemos a segunda lei de Newton ao movimento unidimensional."

Tática 2: Releia o Texto

Se você sabe a que o problema se refere, mas não sabe o que fazer a seguir, ponha-o de lado e releia o texto. Se tem dúvidas acerca da segunda lei de Newton, releia aquela seção. Estude os exemplos. Parte dos Exemplos 5-1 e 5-2 refere-se a movimento unidimensional e leva você ao Cap. 2, mais especificamente à Tabela 2-2, que mostra todas as equações que você provavelmente irá precisar.

Tática 3: Esquematize uma Figura

Você pode precisar de duas figuras. Uma é a representação aproximada da situação real. Quando você esquematizar as forças, desenhe o vetor sobre o limite ou no interior do corpo que está sendo submetido àquela força. A outra é o diagrama de corpo isolado, no qual as forças são

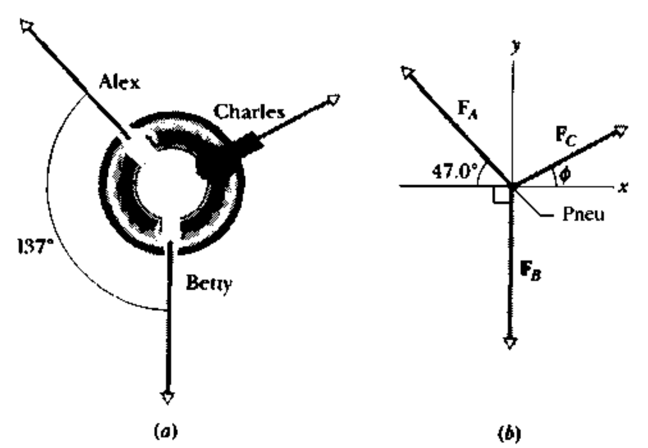


Fig. 5-8 Exemplo 5-4. (*a*) Vista do alto de três pessoas puxando um pneu. (*b*) Diagrama de corpo isolado do pneu.

mostradas, com o corpo representado por um ponto. Atribua a origem de cada vetor nesse ponto.

TÁTICA 4: QUAL É O SEU SISTEMA?
Se estiver utilizando a segunda lei de Newton, é necessário saber a que corpo ou sistema ela está sendo aplicada. Nos Exemplos 5-1 e 5-2, o corpo é o trenó (não o homem, ou o gelo). No Exemplo 5-3, é o caixote (não o caminhão). No Exemplo 5-4, é o pneu (não os cabos, ou as pessoas).

TÁTICA 5: QUAL É O REFERENCIAL ?
Seja claro sobre que referencial está utilizando. Vamos utilizar um referencial relativo à Terra para todos os exemplos seguintes. No Exemplo 5-3, você, com certeza, não deve utilizar o caminhão. Nesse exemplo, o caminhão está acelerado. Um referencial relativo a ele não seria do tipo inercial.

TÁTICA 6: ESCOLHA OS EIXOS ADEQUADAMENTE
No Exemplo 5-4, reduzimos bastante o trabalho fazendo um dos eixos coincidir com uma das forças (o eixo y com $\mathbf{F}_B$). Tente fazer esse exemplo utilizando um sistema de coordenadas em que nenhuma força coincida com qualquer eixo.

5-6 Algumas Forças Específicas

O Peso

O **peso P** de um corpo é a força que o atrai para o objeto astronômico mais próximo, que no nosso caso é a Terra. A força é devida, primariamente, a uma atração — a **atração gravitacional** — entre as massas dos dois corpos, cuja descrição mais pormenorizada será apresentada mais tarde, no Cap. 15. Por ora, vamos considerar apenas as situações em que um corpo de massa m está localizado em um ponto onde o módulo da aceleração em queda livre é g. Nessa situação, o *módulo* do vetor peso (uma força) é

$$P = mg. \qquad (5\text{-}6)$$

Esse *vetor* pode ser apresentado como

$$\mathbf{P} = -mg\mathbf{j} = -P\mathbf{j} \qquad (5\text{-}7)$$

(onde $+\mathbf{j}$ aponta para cima, afastando-se da Terra), ou como

$$\mathbf{P} = m\mathbf{g}, \qquad (5\text{-}8)$$

onde **g** representa o vetor aceleração em queda livre. Em muitos casos, compete a nós a escolha da notação, mas é necessário sermos claros para não nos confundirmos, por exemplo, ao escrevermos a Eq. 5-6, quando na verdade queríamos a Eq. 5-8.

Já que o peso é uma força, sua unidade SI é o newton. Peso *não é massa*, e seu módulo, em qualquer lugar, depende do valor de g neste local. Uma bola de boliche pode pesar 71 N na Terra, mas apenas 12 N na Lua, porque lá g é menor. A massa da bola, 7,2 kg, é a mesma em ambos os lugares, porque é uma propriedade intrínseca da bola. (Se quisermos perder peso, devemos subir montanhas. Não apenas pelo exercício, que reduzirá nossa massa, mas pelo aumento da altitude, que tornará menor o valor de g, à medida que nos afastarmos do centro da Terra. Assim, nosso peso diminuirá.)

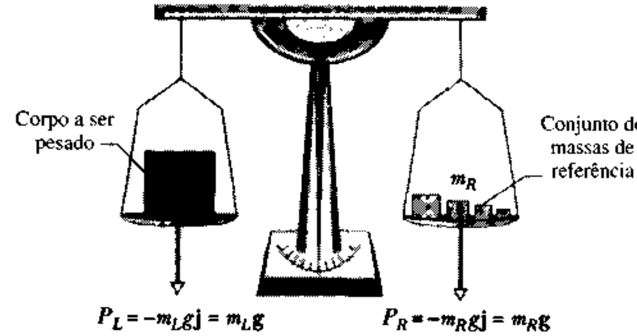


Fig. 5-9 Uma balança de braços simétrica. Quando a massa no prato da esquerda (E) é igual à massa do prato da direita (D), a balança está em equilíbrio.

Normalmente, estabelecemos que o peso é medido em relação a um referencial inercial. Se, ao invés disso, for medido em relação a um referencial não-inercial (como veremos no Exemplo 5-12), obteremos um **peso aparente** e não o peso real.

Podemos *pesar* um corpo colocando-o em um dos pratos de uma balança (Fig. 5-9) e, no outro, vários corpos (de massas conhecidas) como referência, até equilibrarmos os pratos. Então, quando as massas, em ambos os pratos, estiverem igualadas (supondo o mesmo valor para g em ambos os pratos), faremos a pesagem. Ficaremos sabendo, então, a massa m do corpo. Se soubermos o valor de g no local da balança, poderemos determinar o peso do corpo pela Eq. 5-6.

Também podemos pesar um corpo com o auxílio de mola e de escala previamente graduada em unidades de massa ou de peso (Fig. 5-10). O corpo distende aquela mola, deslocando o ponteiro através da escala. (A maioria das ba-

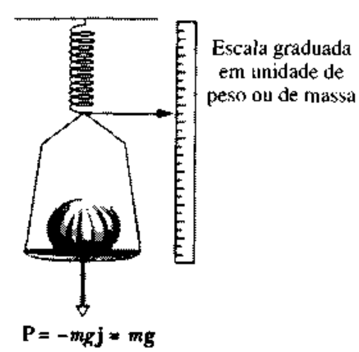


Fig. 5-10 Uma balança de mola. A leitura é proporcional ao *peso* do objeto colocado no prato, e a escala, graduada em unidades de peso, fornece o peso. Se, ao contrário, estiver graduada em unidades de massa, a leitura será precisa somente se a aceleração da gravidade g for a mesma do local onde ela foi calibrada.

Fig. 5-11 Cada elefante é suportado por uma força normal direcionada para cima.

lanças domésticas de banheiro utiliza este sistema.) Se a escala estiver graduada em unidades de massa, ela será exata somente se o valor de g for o mesmo do local onde foi calibrada.

A Força Normal

Quando um corpo pressiona uma superfície, experimenta uma força perpendicular a esta, chamada de **força normal** **N**; o nome vem do termo matemático *normal*, que significa "perpendicular".

Se um corpo repousa sobre uma superfície horizontal, como nas Figs. 5-11 e 5-12*a*, **N** está dirigido para cima e o peso do corpo $\mathbf{P} = m\mathbf{g}$ está direcionado para baixo. Da Eq. 5-2, obtemos o módulo de **N**:

$$\sum F_y = N - mg = ma_y, \qquad (5\text{-}9)$$

logo, com $a_y = 0$,

$$N = mg. \qquad (5\text{-}10)$$

Resolução de Problemas

Tática 7: Força Normal

A Eq. 5-10 é válida para a força normal somente quando **N** está dirigido para cima e a aceleração vertical é nula. Assim, não devemos aplicá-la para outras orientações de **N** ou quando a aceleração vertical for diferente de zero. Por isso, vamos aprender um procedimento para determinar **N**, utilizando a segunda lei de Newton em termos de suas componentes.

Podemos mover **N** livremente numa figura, desde que sua orientação seja mantida. Por exemplo, na Fig. 5-12*a* podemos deslocar o vetor para baixo até que a ponta da seta coincida com a interface corpo-mesa. Todavia, **N** pode ser, provavelmente, menos mal-interpretada se a sua origem estiver sobre o corpo ou no interior deste (conforme mostrado). A melhor técnica é mesmo desenhar o diagrama de corpo isolado, como na Fig. 5-12*b*, com a origem de **N** no ponto que representa o corpo.

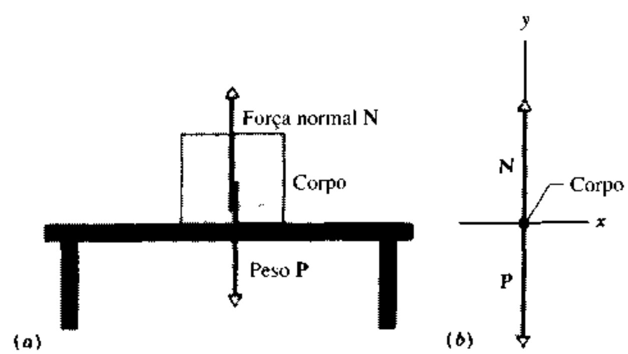


Fig. 5-12 (*a*) O corpo parado sobre o tampo de uma mesa é submetido a uma força normal **N**, perpendicular à mesa. (*b*) O diagrama de corpo isolado correspondente.

O Atrito

Se deslizarmos ou tentarmos deslizar um corpo sobre uma superfície, o movimento será dificultado pelo contato entre o corpo e a superfície. (Vamos discutir mais isso no próximo capítulo.) Vamos supor que a resistência ao movimento é devida a uma única força **f**, denominada **força de atrito**, ou simplesmente **atrito**. A força tem sentido contrário ao movimento e é paralela à superfície (Fig. 5-13). Algumas vezes, por simplicidade, admitimos que essa força é desprezível, ou seja, falamos em superfície *sem atrito*.

A Tração

Quando uma corda (um tirante, um cabo ou assemelhado) é presa a um corpo e esticada, dizemos que ela está sob **tração** (ou tensão). Ela puxa o corpo com uma força **T**, aplicada ao ponto de conexão da corda com o corpo, na direção da corda e no sentido para fora do corpo (Fig. 5-14*a*).

Em geral, a corda é considerada *sem massa* (significando que sua massa em relação à do corpo é desprezível) e não-extensível. A corda existe somente como conexão entre dois corpos. Ela puxa um corpo em cada extremidade com a mesma magnitude T, mesmo que os corpos e a corda estejam acelerados e mesmo que a corda se movimente

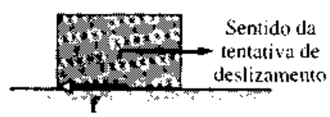


Fig. 5-13 Força de atrito **f** que se opõe à tentativa de deslizamento do corpo sobre uma superfície.

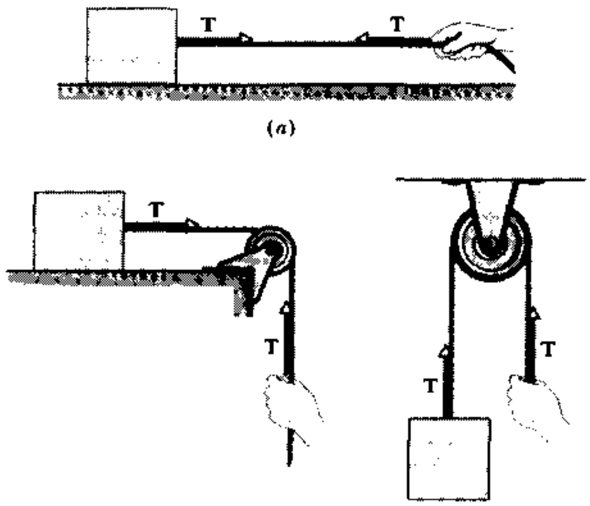


Fig. 5-14 (*a*) A corda esticada está sob tensão. Ela puxa os corpos em cada extremidade com força **T**. (*b*) A mesma situação é válida para uma corda que passa por uma polia de massa e atrito desprezíveis.

sobre uma polia de *massa* e *atrito desprezíveis* (Fig. 5-14*b*). Ou seja, a polia tem massa desprezível, comparada às massas dos corpos, e atrito desprezível no seu eixo de rotação.

EXEMPLO 5-5 Vamos voltar a John Massis e o vagão de trem, e supor que ele puxou-o (com seus dentes) pela extremidade da corda com uma força constante igual a 2,5 vezes o peso do seu corpo, fazendo um ângulo θ de 30° com a horizontal. Sua massa m era 80 kg. O peso P do vagão era $7{,}0 \times 10^5$ N (cerca de 80 ton) e ele deslocou-o por cerca de 1,0 m sobre os trilhos. Suponha que as rodas não sofreram resistência dos trilhos ao rolamento. Qual era a velocidade do vagão quando acabou de ser puxado?

Solução A Fig. 5-15 mostra o diagrama de corpo isolado, no qual o vagão é representado por um ponto. O eixo x representa a direção dos trilhos. Da Eq. 5-2, temos

$$\sum F_x = T\cos\theta = Ma_x \qquad (5\text{-}11)$$

onde M é a massa do vagão.

De acordo com as suposições acima, a força que Massis usou para puxar o vagão foi

$$T = 2{,}5mg = (2{,}5)(80\ \text{kg})(9{,}8\ \text{m/s}^2) = 1.960\ \text{N}$$

que é o peso médio que pode ser levantado por um bom halterofilista.

O peso P do vagão é

$$P = Mg,$$

e sua massa M é

$$M = \frac{P}{g} = \frac{7.0 \times 10^5\ \text{N}}{9.8\ \text{m/s}^2} = 7.143 \times 10^4\ \text{kg}.$$

Da Eq. 5-11, determinamos sua aceleração, como sendo

$$a_x = \frac{T\cos\theta}{M} = \frac{(1960\ \text{N})(\cos 30°)}{7.143 \times 10^4\ \text{kg}}$$
$$= 2.376 \times 10^{-2}\ \text{m/s}^2.$$

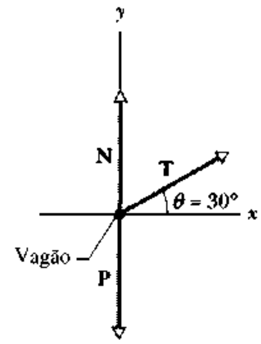


Fig. 5-15 Exemplo 5-5. Diagrama de corpo isolado para os vagões puxados por Massis. Os vetores estão fora de escala; a tensão na corda é *muito* menor do que o peso e a força normal.

Vamos utilizar a Eq. 2-14 para determinar a velocidade do vagão, quando acabou de ser puxado, com o subscrito relativo ao eixo x e fazendo $v_0 = 0$ e $x - x_0 = 1{,}0$ m:

$$v_x^2 = v_{0x}^2 + 2a_x(x - x_0),$$

ou

$$v_x = \sqrt{0 + (2)(2.376 \times 10^{-2}\ \text{m/s}^2)(1.0\ \text{m})}$$
$$= 0.22\ \text{m/s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Se a corda fosse presa a um ponto mais alto do vagão, de maneira que ficasse na horizontal, o resultado de Massis teria sido bem melhor. Você consegue ver por quê?

5-7 Terceira Lei de Newton

As forças existem em pares. Se um martelo exerce uma força sobre um prego, o prego exerce uma força igual e de sentido contrário sobre o martelo. Se nos apoiarmos numa parede de tijolos, a parede nos empurra de volta (Fig. 5-16).

Fig. 5-16 O homem aplica uma força para a direita sobre a parede. A parede exerce uma força para a esquerda sobre o homem. As forças têm o mesmo módulo.

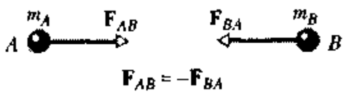


Fig. 5-17 A terceira lei de Newton. O corpo *A* exerce uma força $\mathbf{F}_{BA}$ sobre o corpo *B*, ao mesmo tempo que o corpo *B* exerce uma força $\mathbf{F}_{AB}$ sobre o corpo *A*, onde $\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}$.

Esta situação pode ser resumida nestas simples palavras: "Não podemos tocar sem ser tocados."

Na Fig. 5-17, considere que o corpo *A* exerça uma força $\mathbf{F}_{BA}$ sobre o corpo *B*; a experiência revela que o corpo *B*, então, exerce uma força $\mathbf{F}_{AB}$ sobre o corpo *A*. Estas duas forças têm o mesmo módulo e sentidos contrários. Isto é,

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA} \quad \text{(terceira lei de Newton)} \qquad (5\text{-}12)$$

Observe a ordem dos subscritos. $\mathbf{F}_{AB}$, por exemplo, é a força exercida *pelo* corpo *B sobre* o corpo *A*. A Eq. 5-12 permanece válida, não importa se os corpos estão parados ou em movimento.

A Eq. 5-12 resume a terceira lei de Newton para o movimento. Em geral, uma dessas forças (não importa qual) é chamada de **força de ação**. A outra é chamada de **força de reação**. Toda vez que determinarmos uma força, uma boa pergunta será: "Onde está a força de reação?"

"A toda ação corresponde sempre uma reação de igual magnitude e de sentido contrário", são palavras consagradas na linguagem popular, que significam coisas diferentes para várias pessoas. Na física, entretanto, essas palavras significam apenas a Eq. 5-12 e nada mais. Não estão envolvidos causa e efeito, de forma particular; a força de ação pode ser qualquer uma delas.

Você pode indagar: "Se a cada força corresponde uma força igual e de sentido contrário, associada a ela, porque não se cancelam mutuamente? Como alguma coisa consegue se mover?" A resposta é simples. Conforme vemos na Fig. 5-17, os dois membros do par ação-reação *sempre* se referem a corpos diferentes, de maneira que não há possibilidade de se cancelarem mutuamente. Se duas forças atuam no *mesmo* corpo, elas *não* são um par ação-reação, mesmo que tenham módulos iguais e sentidos opostos. Vamos identificar, em dois exemplos, o par ação-reação.

Um Satélite em Órbita

A Fig. 5-18 mostra um satélite orbitando a Terra. A única força que atua sobre ele é $\mathbf{F}_{ST}$, a força exercida *sobre* o satélite *pela* atração gravitacional da Terra. Onde está a força de reação correspondente? É a força $\mathbf{F}_{TS}$, que atua na Terra, devido à atração gravitacional do satélite; seu ponto de aplicação efetivo é considerado no centro da Terra.

Podemos achar que o pequeno satélite não pode exercer uma força gravitacional muito grande sobre a Terra, mas ele o faz, exatamente como estabelece a terceira lei de Newton. Ou seja, considerando apenas os módulos, $F_{TS} = F_{ST}$. A força $\mathbf{F}_{TS}$ provoca uma aceleração na Terra, mas, devido à grande massa desta, sua aceleração é muito pequena para ser detectada.

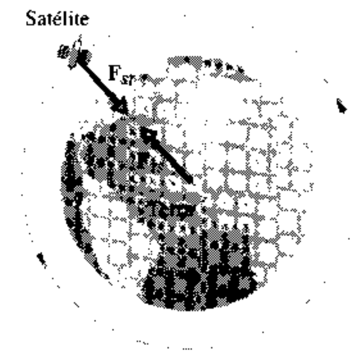


Fig. 5-18 Um satélite orbitando a Terra. As forças mostradas são um par ação-reação. Observe que elas atuam sobre corpos distintos.

Um Melão sobre uma Mesa*

A Fig. 5-19*a* mostra um melão em repouso sobre uma mesa. A Terra puxa o melão para baixo com uma força $\mathbf{F}_{MT}$, peso do melão. O melão não é acelerado porque essa força é cancelada por uma força igual e de sentido contrário, a força normal $\mathbf{F}_{Mm}$ exercida pela mesa *m* sobre o melão *M*. (Veja Fig. 5-19*b*.) Todavia, $\mathbf{F}_{MT}$ e $\mathbf{F}_{Mm}$ *não* formam um par ação-reação, *porque elas atuam no mesmo corpo, o melão.*

A força de reação para $\mathbf{F}_{MT}$ é $\mathbf{F}_{TM}$, a força (gravitacional) com a qual o melão atrai a Terra. Esse par ação-reação está mostrado na Fig. 5-19*c*.

A força de reação para $\mathbf{F}_{Mm}$ é $\mathbf{F}_{mM}$, a força do melão sobre a mesa. Este par está mostrado na Fig. 5-19*d*. Então, os pares ação-reação, nesse problema, e os corpos onde eles atuam, são

$$\text{Primeiro par: } \mathbf{F}_{MT} = -\mathbf{F}_{TM} \qquad \text{(melão e Terra)}$$

e

$$\text{Segundo par: } \mathbf{F}_{Mm} = -\mathbf{F}_{mM} \qquad \text{(melão e mesa).}$$

Podemos usar uma cabine de elevador em movimento para classificar, apropriadamente, as quatro forças mostradas na Fig. 5-19 num par ação-reação. Suponhamos um elevador acelerando para cima. O melão e a mesa dentro do elevador se pressionariam mutuamente com uma força maior. As forças de contato $\mathbf{F}_{mM}$ e $\mathbf{F}_{Mm}$ (veja Fig. 5-19*d*) aumentariam em módulo, mas permaneceriam iguais e com sentidos opostos. No entanto, as forças gravitacionais $\mathbf{F}_{MT}$ e $\mathbf{F}_{TM}$ (veja Fig. 5-19*c*) permaneceriam invariáveis. Ambos os pares de forças continuariam a obedecer à terceira lei de Newton. O melão se movimentaria, porque $\mathbf{F}_{MT}$ e $\mathbf{F}_{Mm}$

* Vamos ignorar pequenas complicações causadas pela rotação da Terra.

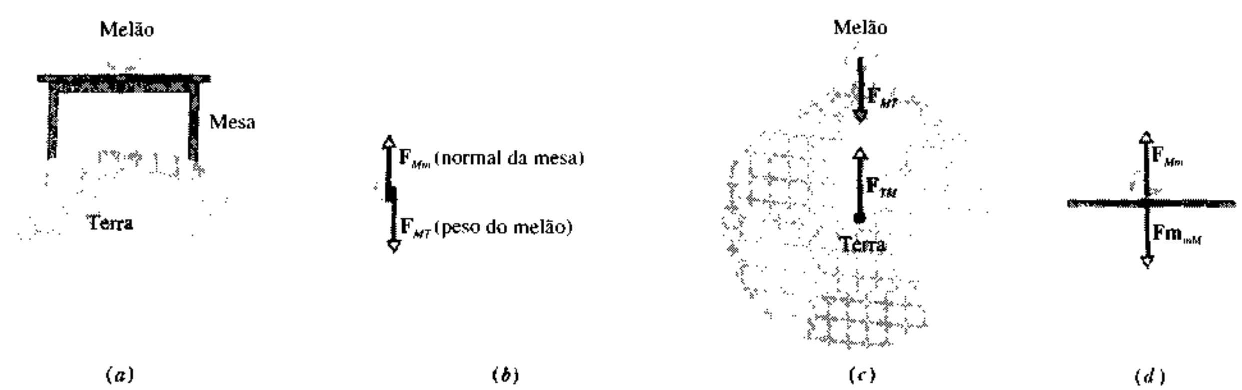


Fig. 5-19 *(a)* Um melão repousa sobre a mesa, que repousa sobre a Terra. *(b)* As forças *sobre o melão* $\mathbf{F}_{Mm}$ e $\mathbf{F}_{MT}$. O melão está em repouso porque estas forças se anulam. *(c)* O par ação-reação para as forças melão-Terra. *(d)* O par ação-reação para as forças melão-mesa.

(que não é um par ação-reação) não mais se cancelariam mutuamente.

Você poderia acreditar ser mais simples analisar um satélite em órbita — dentro do contexto da terceira lei de Newton — do que um melão em repouso sobre uma mesa?

5-8 Aplicação das Leis de Newton

O restante deste capítulo consiste nos Exemplos 5-6 até 5-12. Devemos analisar profundamente esses exemplos, aprendendo não apenas as respostas específicas de cada um, mas, principalmente, como proceder na abordagem de um problema. É muito importante saber como transformar a representação de uma experiência física num diagrama de corpo isolado, com eixos adequados, para que as leis de Newton possam ser aplicadas. Vamos iniciar com o Exemplo 5-6, que está desenvolvido com bastantes detalhes, utilizando o esquema pergunta-resposta.

EXEMPLO 5-6 A Fig. 5-20 mostra um bloco (o *bloco deslizante*) de massa $M = 3{,}3$ kg. Ele se move livremente, sem atrito, sobre uma fina camada de ar na superfície horizontal de uma mesa. O bloco deslizante está preso a uma corda que passa em volta de uma polia de massa e atrito desprezíveis e tem, na outra extremidade, um segundo bloco (o *bloco suspenso*) de massa $m = 2{,}1$ kg. O bloco suspenso, ao cair, acelera o bloco deslizante para a direita.

Determine (a) a aceleração do bloco deslizante, (b) a aceleração do bloco suspenso e (c) a tensão na corda.

P *O que é abordado neste exemplo?*

Foram dadas duas massas, um bloco deslizante e um bloco suspenso. Pode não nos ocorrer, mas a Terra também é um dado, porque puxa (atrai) as massas; sem a Terra, nada poderia acontecer. Nesses blocos há cinco forças envolvidas, como mostra a Fig. 5-21:

1. A corda puxa o bloco deslizante para a direita com uma força de intensidade T.
2. A corda puxa o bloco suspenso para cima com uma força de igual intensidade T. Ela impede que o bloco suspenso caia livremente. Supomos que a tensão seja uniforme em toda a corda; a polia apenas muda a direção da força, sem variar sua magnitude.
3. A Terra puxa o bloco deslizante para baixo com uma força $M\mathbf{g}$, que é o peso deste bloco.
4. A Terra puxa o bloco suspenso para baixo com uma força $m\mathbf{g}$, que é o peso do bloco suspenso.
5. A mesa empurra o bloco deslizante para cima com a força normal $\mathbf{N}$.

Há outra coisa que devemos notar. Vamos estabelecer que a corda tem comprimento constante, ou seja, se o bloco suspenso cair 1 mm, num certo intervalo de tempo, o bloco deslizante também se deslocará 1 mm para a direita, no mesmo intervalo de tempo. Os blocos se deslocam solidariamente e suas acelerações têm módulos iguais.

P *Como classificar este exemplo? Ele nos sugere alguma lei da física em particular?*

Sim, sugere. Forças, massas e acelerações estão envolvidas, e isto propõe a aplicação da segunda lei de Newton para o movimento, $\sum\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.

P *Se usássemos essa lei neste exemplo, a que corpo a aplicaríamos?*

Neste exemplo, dois corpos são enfocados: o bloco deslizante e o bloco suspenso. Embora sejam objetos mensuráveis, podemos tratá-los como partículas, porque todas as partes minúsculas (como os átomos) se movem exatamente da mesma forma. Vamos aplicar a segunda lei de Newton a cada bloco, separadamente.

P *E em relação à polia?*

Não podemos representar a polia como uma partícula porque suas várias partes se movem de diferentes maneiras. Quando estudarmos rotação, vamos tratar de polias com mais detalhes. Enquanto isso, contornamos esse problema de uma forma prática, isto é, vamos admitir que

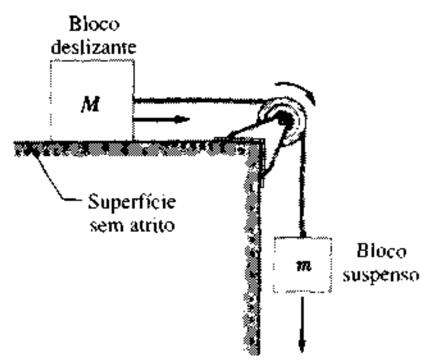


Fig. 5-20 Exemplo 5-6. Um bloco de massa M sobre uma superfície horizontal, sem atrito, está ligado a outro bloco de massa m por uma corda que passa em volta de uma polia. As massas da corda e da polia são nulas; ou seja, são desprezíveis se comparadas às massas dos blocos. A polia não tem atrito, ou seja, a força de atrito que se opõe ao movimento rotacional do seu eixo é desprezível. As setas indicam o movimento quando o sistema parte do repouso.

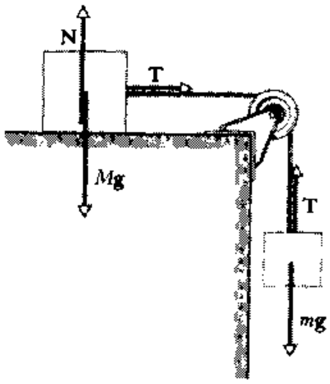


Fig. 5-21 As forças que atuam nos dois blocos da Fig. 5-20.

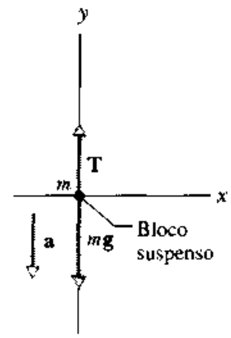


Fig. 5-23 O diagrama de corpo isolado para o bloco suspenso da Fig. 5-20.

a massa da polia é desprezível em relação às massas dos blocos. A única *função da polia (que supostamente é isenta de atrito em seu eixo) é* mudar a direção da corda que une os dois blocos.

P *Muito bem! Agora, como aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ ao bloco deslizante?*
Vamos representar o bloco deslizante como uma partícula de massa M e desenhar *todas* as forças que atuam *sobre* ele, como na Fig. 5-22. Este é o *diagrama de corpo isolado* do bloco. Há três forças envolvidas. A seguir, vamos estabelecer um eixo horizontal (eixo x). É interessante desenhar esse eixo paralelo à superfície da mesa, na direção da movimentação do bloco.

P *Grato, mas ainda não foi dito como aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ ao bloco deslizante. Tudo o que foi dito é como desenhar o diagrama de corpo isolado.*
Certo. $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ é uma equação vetorial, mas podemos apresentá-la como três equações escalares. Assim,

$$\sum F_x = Ma_x, \quad \sum F_y = Ma_y, \quad \sum F_z = Ma_z, \tag{5-13}$$

onde $\sum F_x$, $\sum F_y$ e $\sum F_z$ são os componentes da força resultante. Sabemos, da Eq. 5-10, que não há força resultante na direção de y: o peso $\mathbf{P}$ do bloco está equilibrado pela força normal $\mathbf{N}$, que atua no bloco para cima. Nenhuma força atua na direção z, que é perpendicular à página. Logo, só a primeira das Eqs. 5-13 tem utilidade.

Como na direção x há somente um componente, então $\sum F_x = Ma_x$ vem a ser

$$T = Ma. \tag{5.14}$$

Esta equação tem duas grandezas desconhecidas, T e a, então, não podemos resolvê-la por enquanto. Entretanto, é bom lembrar que ainda não falamos nada acerca do bloco suspenso.

P *De acordo. Como aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ ao bloco suspenso?*
Vamos desenhar um diagrama de corpo isolado para este bloco, conforme a Fig. 5-23. Desta vez, vamos usar a segunda das Eqs. 5-13, encontrando

$$\sum F_y = T - mg = -ma, \tag{5.15}$$

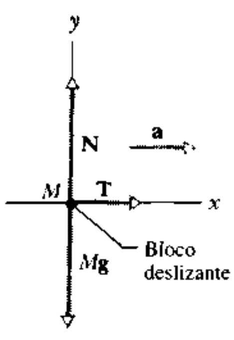


Fig. 5-22 O diagrama de corpo isolado para o bloco deslizante da Fig. 5-20.

onde o sinal menos, no segundo membro da equação, significa que o *bloco acelera para baixo, no sentido negativo do eixo y.* A Eq. 5-15 fica

$$mg - T = ma. \tag{5.16}$$

que contém as mesmas grandezas desconhecidas da Eq. 5-14. Ao somarmos essas duas equações, T se cancelará. Resolvendo para a temos

$$a = \frac{m}{M + m}g. \quad \text{(Resposta)} \tag{5-17}$$

Substituindo este resultado em 5-14, fica

$$T = \frac{Mm}{M + m}g. \quad \text{(Resposta)} \tag{5-18}$$

Substituindo as incógnitas pelos valores numéricos fornecidos, temos

$$a = \frac{m}{M + m}g = \frac{2.1 \text{ kg}}{3.3 \text{ kg} + 2.1 \text{ kg}}(9.8 \text{ m/s}^2)$$
$$= 3.8 \text{ m/s}^2 \quad \text{(Resposta)}$$

e

$$T = \frac{Mm}{M + m}g = \frac{(3.3 \text{ kg})(2.1 \text{ kg})}{3.3 \text{ kg} + 2.1 \text{ kg}}(9.8 \text{ m/s}^2)$$
$$= 13 \text{ N}. \quad \text{(Resposta)}$$

P *O exemplo agora está resolvido, certo?*
Esta é uma boa pergunta, mas não estamos aqui apenas para resolver problemas e sim para aprender física, principalmente. Este exemplo não estará realmente resolvido até que tenhamos examinado os resultados para ver se são consistentes. Esta, freqüentemente, é uma experiência muito mais construtiva do que simplesmente obter a resposta certa.

Vamos olhar primeiro para a Eq. 5-17. Observamos que ela está dimensionalmente correta, e também que a aceleração a sempre será menor do que g. Como, aliás, deve ser, porque o bloco suspenso não cai. A corda o puxa para cima.

Agora, vamos examinar a Eq. 5-18, que será reescrita na forma

$$T = \frac{M}{M + m}mg. \tag{5-19}$$

Assim, é mais fácil ver que esta equação também está dimensionalmente correta, porque tanto T como mg são forças. Pela Eq. 5-19 também vemos que a tensão na corda é sempre menor do que mg, o peso do bloco suspenso. O que é razoável, porque se T fosse *maior* do que mg, o bloco suspenso estaria se movendo para cima!

Também podemos conferir os resultados através de casos especiais, onde podemos adivinhar qual seria a resposta. Um exemplo simples é fazer $g = 0$, como se a experiência fosse levada para o espaço intereste-

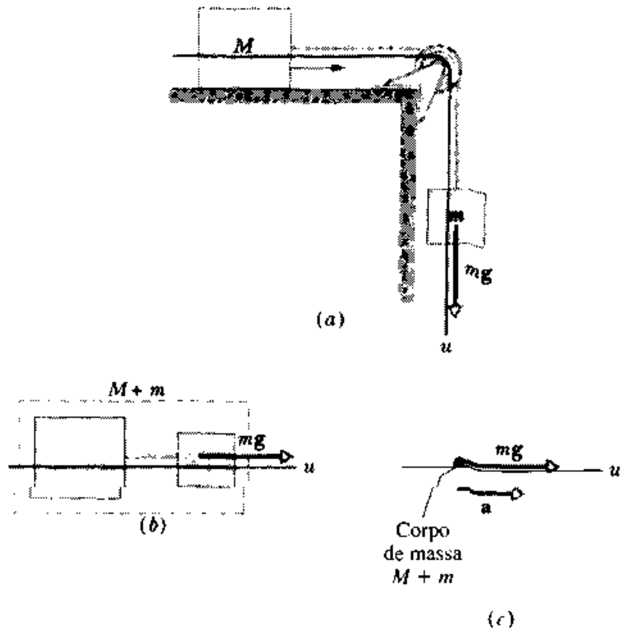


Fig. 5-24 (*a*) Um "eixo" u passando pelo sistema da Fig. 5-20. (*b*) Os blocos são representados retilineamente em u e são tratados, agora, como um único corpo de massa $M + m$. (*c*) O diagrama de corpo livre associado, considerando *apenas* as forças *no eixo* u. *Existe só uma força.*

lar. Sabemos que, neste caso, os blocos permaneceriam em repouso e não haveria nenhuma tensão na corda. As fórmulas estão de acordo com isso? Sim, claro. Se fizermos $g = 0$ nas Eqs. 5-17 e 5-18, encontramos $a = 0$ e $T = 0$. Dois outros casos especiais são $M = 0$ e $m \to \infty$.

EXEMPLO 5-6 — UMA OUTRA MANEIRA* A aceleração a dos blocos da Fig. 5-20 pode ser determinada em apenas duas linhas de álgebra se (a) *utilizarmos um eixo não-convencional* chamado de u, que passa por *ambos* os blocos na extensão da corda, conforme mostrado na Fig. 5-24*a*, depois, (b) mentalmente tornamos esse eixo retilíneo, como na Fig. 5-24*b*, e tratamos os dois blocos como sendo um único corpo formado pelas massas $M + m$. A Fig. 5-24*c* mostra um diagrama de corpo livre para o sistema de dois blocos.

Solução Observe que há somente uma força atuando no sistema, no sentido positivo do eixo u, que é a força mg. A tensão T da Fig. 5-21 é agora uma força interna do sistema de corpos e, portanto, não é considerada pela segunda lei de Newton. A força exercida pela polia na corda é perpendicular ao eixo u, e também não é considerada no cálculo.

Usando a Eq. 5-2 como referência, escrevemos a equação do componente da aceleração no eixo u:

$$\sum F_u = (M + m)a_u,$$

onde a massa do corpo é $M + m$. A aceleração do sistema no eixo u (e de cada bloco individualmente, já que eles estão conectados) tem módulo a. A única força, no eixo u, que atua no sistema tem módulo mg. Assim, nossa equação vem a ser

$$mg = (M + m)a,$$

ou

$$a = \frac{m}{M + m}g, \qquad (5\text{-}20)$$

*No Brasil, há controvérsias a respeito dessa outra maneira de resolver o Exemplo. Optamos por mantê-la por ser parte integrante da obra. (N. do S.)

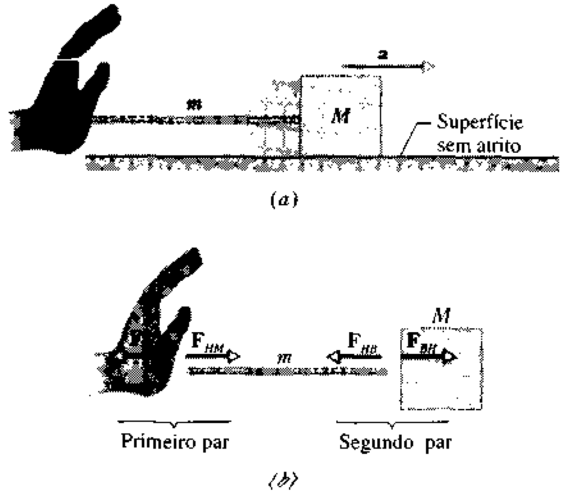


Fig. 5-25 Exemplo 5-7. (*a*) Um bloco de massa M é empurrado por meio de uma haste de massa m sobre uma superfície sem atrito. (*b*) Vista expandida mostrando os pares ação-reação, entre a mão e a haste (primeiro par) e entre a haste e o bloco (segundo par).

que está de acordo com a Eq. 5-17.

Para determinarmos T, aplicamos a segunda lei de Newton a cada corpo, separadamente, obtendo cada uma das Eq. 5-14 ou Eq. 5-16. Então substituímos o valor de a da Eq. 5-20 e calculamos T, obtendo a Eq. 5-18.

EXEMPLO 5-7 Um bloco de massa $M = 33$ kg é empurrado sobre uma superfície sem atrito por meio de uma haste de massa $m = 3{,}2$ kg, conforme a Fig. 5-25*a*. O bloco se desloca (a partir do repouso) por uma distância $d = 77$ cm, em 1,7 s, com aceleração constante.

a. Identifique todos os pares ação-reação neste exemplo.

Solução Como mostra o esquema detalhado da Fig. 5-25*b*, há dois pares ação-reação:

Primeiro par:	$\mathbf{F}_{MH} = -\mathbf{F}_{HM}$	(mão e haste)
Segundo par:	$\mathbf{F}_{HB} = -\mathbf{F}_{BH}$	(haste e bloco).

A força da haste sobre a mão $\mathbf{F}_{MH}$ é a força que sentiríamos se a mão da Fig. 5-25 fosse a nossa.

b. Que força a mão deve exercer sobre a haste?

Solução Esta é a força que move o bloco e a haste. Para encontrá-la, devemos primeiro determinar a aceleração constante a, através da Eq. 2-13:

$$x - x_0 = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2.$$

Fazendo $v_0 = 0$ e $x - x_0 = d$, calculamos a

$$a = \frac{2d}{t^2} = \frac{(2)(0{,}77\ \text{m})}{(1{,}7\ \text{s})^2} = 0{,}533\ \text{m/s}^2.$$

Para calcular a força exercida pela mão, aplicamos a segunda lei de Newton ao sistema formado pela haste e o bloco juntos. Então,

$$F_{HM} = (M + m)a = (33\ \text{kg} + 3{,}2\ \text{kg})(0{,}533\ \text{m/s}^2)$$
$$= 19{,}3\ N \approx 19\ N. \qquad \textit{(Resposta)}$$

c. Com que força a haste empurra o bloco?

Solução Para determinar esta força, vamos aplicar a segunda lei de Newton para o bloco individualmente:

$$F_{BH} = Ma = (33\ \text{kg})(0{,}533\ \text{m/s}^2)$$
$$= 17.6\ \text{N} \approx 18\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

d. Qual a força resultante na haste?

Solução Podemos determinar o módulo F dessa força de duas maneiras. Primeiro, usando os resultados de (b) e (c) anteriormente calculados; temos

$$F = F_{HM} - F_{HB} = 19{,}3\ \text{N} - 17.6\ \text{N}$$
$$= 1{,}7\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Observe que aqui foi usada a terceira lei de Newton, ao estabelecermos que $\mathbf{F}_{HB}$, a força do bloco sobre a haste, tem o mesmo módulo de $\mathbf{F}_{BH}$ (17,6 N, sem arredondamento).

A segunda maneira de obter a resposta é aplicar a segunda lei de Newton diretamente à haste. Então, temos

$$F = ma = (3{,}2\ \text{kg})(0{,}533\ \text{m/s}^2) = 1.7\ \text{N}, \qquad \text{(Resposta)}$$

que concorda com o nosso primeiro resultado. Como deve ser, porque os dois métodos são algebricamente idênticos; verifique.

EXEMPLO 5-8 A Fig. 5-26*a* mostra um bloco de massa $m = 15$ kg suspenso por três cordas. Quais as tensões nas cordas?

Solução A Fig. 5-26*b* mostra o diagrama de corpo isolado para o bloco: a tensão $\mathbf{T}_C$ na corda C puxa para cima, enquanto o peso do bloco mg está direcionado para baixo. Como o sistema está em repouso, aplicando a segunda lei de Newton ao bloco, temos

$$\sum F_y = T_C - mg = 0,$$

ou

$$T_C = mg = (15\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)$$
$$= 147\ \text{N} \approx 150\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

A dica para o próximo passo é compreender que o nó, na junção das três cordas, é apenas o ponto de atuação das três forças, e é neste ponto que aplicaremos a segunda lei de Newton. A Fig. 5-26*c* mostra o diagrama de corpo isolado para o nó. Como o nó não está acelerado, a força resultante neste ponto é nula. Logo,

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{T}_A + \mathbf{T}_B + \mathbf{T}_C = 0.$$

Esta equação vetorial é equivalente a duas equações escalares

$$\sum F_y = T_A \operatorname{sen} 28° + T_B \operatorname{sen} 47° - T_C = 0 \qquad (5\text{-}21)$$

e

$$\sum F_x = -T_A \cos 28° + T_B \cos 47° = 0. \qquad (5\text{-}22)$$

Observe com atenção que, quando escrevemos a componente x de $\mathbf{T}_A$ como $T_A \cos 28°$, devemos incluir o sinal menos para indicar que ela está no sentido negativo do eixo x.

Substituindo os valores numéricos em 5-21 e 5-22 ficamos com

$$T_A(0.469) + T_B(0.731) = 147\ \text{N} \qquad (5\text{-}23)$$

e

$$T_B(0.682) = T_A(0.883). \qquad (5\text{-}24)$$

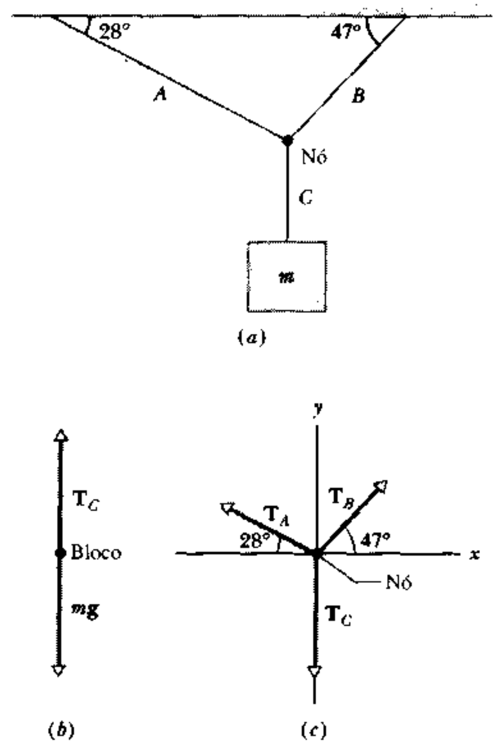


Fig. 5-26 Exemplo 5-8. (*a*) Um bloco de massa m está suspenso por três cordas. (*b*) O diagrama de corpo isolado do bloco. (*c*) O diagrama de corpo isolado do ponto de interseção das três cordas.

Da Eq. 5-24, temos

$$T_B = \frac{0{,}883}{0.682} T_A = 1{,}29\ T_A.$$

Substituindo esta grandeza em 5-23 e resolvendo para T_A, vamos obter

$$T_A = \frac{147\ \text{N}}{0{,}469 + (1{,}29)(0.731)}$$
$$= 104\ \text{N} \approx 100\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Finalmente, T_B é calculado de

$$T_B = 1{,}29 T_A = (1{,}29)(104\ \text{N})$$
$$= 134\ \text{N} \approx 130\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

EXEMPLO 5-9 A Fig. 5-27*a* mostra um bloco de massa $m = 15$ kg seguro por uma corda, sobre um plano inclinado sem atrito. Se $\theta = 27°$, qual a tensão na corda? Que força é exercida pelo plano sobre o bloco?

Solução A Fig. 5-27*b* é o diagrama de corpo isolado para o bloco. Sobre ele atuam as seguintes forças: (1) a força normal **N**, direcionada para fora do plano em que ele repousa; (2) a tensão **T** na corda; e (3) o peso **P** (= $m\mathbf{g}$). Como a aceleração do bloco é zero, a força resultante sobre ele é, então, pela segunda lei de Newton, nula

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{T} + \mathbf{N} + m\mathbf{g} = 0. \qquad (5\text{-}25)$$

Vamos escolher um sistema de coordenadas com o eixo x paralelo ao plano. Com esta escolha, não apenas uma, mas duas forças (**N** e **T**) ficam alinhadas com os eixos (uma vantagem). Observe que o ângulo entre o vetor peso e o sentido negativo do eixo y é igual ao ângulo de inclinação do plano. As componentes x e y desse vetor são determinadas pelo triângulo da Fig. 5-27*c*.

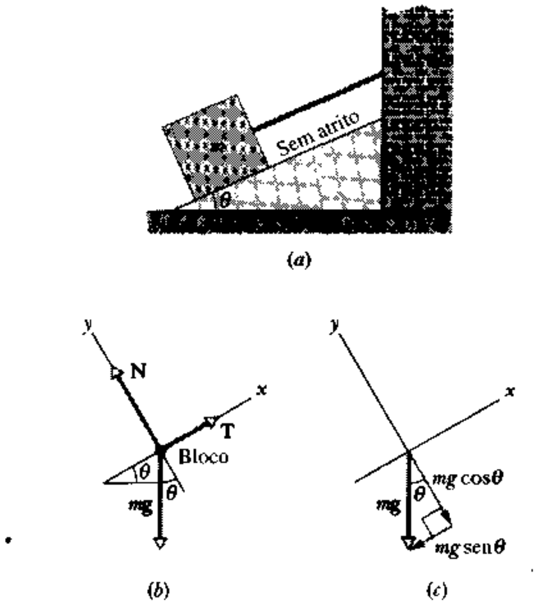


Fig. 5-27 Exemplos 5-9 e 5-10. (*a*) Um bloco de massa m em repouso sobre um plano liso, preso por uma corda. (*b*) O diagrama de corpo isolado do bloco. Observe como são localizados os eixos coordenados. (*c*) Determinação das componentes x e y de $m\mathbf{g}$.

As componentes da Eq. 5-25 são

$$\sum F_x = T - mg \operatorname{sen} \theta = 0$$

e

$$\sum F_y = N - mg \cos \theta = 0.$$

Então,

$$\begin{aligned} T &= mg \operatorname{sen} \theta \\ &= (15 \text{ kg})(9{,}8 \text{ m/s}^2)(\operatorname{sen} 27°) \\ &= 67 \text{ N} \qquad \text{(Resposta)} \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} N &= mg \cos \theta \\ &= (15 \text{ kg})(9{,}8 \text{ m/s}^2)(\cos 27°) \\ &= 131 \text{ N} \approx 130 \text{ N}. \qquad \text{(Resposta)} \end{aligned}$$

EXEMPLO 5-10 Suponha que a corda que segura o bloco da Fig. 5-27*a* seja cortada. Qual a aceleração do bloco?

Solução Ao cortarmos a corda, a tensão **T** na Fig. 5-27*b* deixa de existir. As duas forças restantes não se cancelam e, realmente, não poderiam, porque não são colineares. Aplicando a segunda lei de Newton às componentes x das forças **N** e $m\mathbf{g}$, na Fig. 5-27*b*, temos agora

$$\sum F_x = 0 - mg \operatorname{sen} \theta = ma,$$

assim,

$$a = -g \operatorname{sen} \theta. \qquad (5\text{-}26)$$

Observe que a força normal **N** não contribui para a aceleração, porque sua componente x é zero.

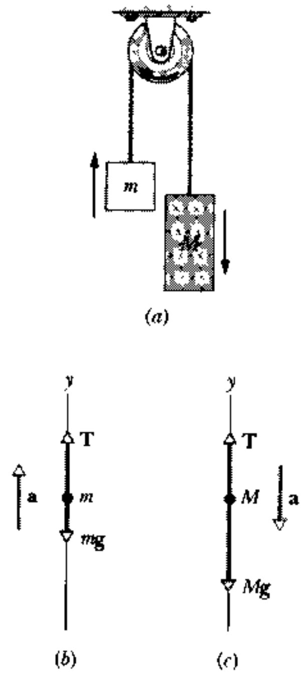


Fig. 5-28 Exemplo 5-11. (*a*) Um bloco de massa M e outro de massa m estão ligados por uma corda que passa por uma polia. Quando o sistema sai do repouso, o sentido do movimento é mostrado pelos vetores **a**. (*b*) O diagrama de corpo isolado do bloco m. (*c*) O diagrama de corpo isolado do bloco M.

Da Eq. 5-26, temos

$$a = -(9{,}8 \text{ m/s}^2)(\operatorname{sen} 27°) = -4{,}4 \text{ m/s}^2. \qquad \text{(Resposta)}$$

O sinal menos indica que a aceleração está no sentido decrescente do eixo x, isto é, descendo o plano.

A Eq. 5-26 mostra que a aceleração do bloco independe da massa, assim como a aceleração de um corpo em queda livre também é independente da massa. Realmente, a Eq. 5-26 mostra que um plano inclinado pode ser usado para "diluir" a aceleração da gravidade — "moderá-la" — de maneira que os efeitos da "queda" possam ser estudados mais facilmente. Para $\theta = 90°$, a Eq. 5-26 estabelece $a = -g$; para $\theta = 0°$, estabelece $a = 0$. Ambos são resultados esperados.

EXEMPLO 5-11 A Fig. 5-28*a* mostra dois blocos ligados por uma corda, passando por uma polia de massa e atrito desprezíveis. Fazendo $m = 1{,}3$ kg e $M = 2{,}8$ kg, determine a tensão na corda e o módulo da aceleração (simultânea) dos dois blocos.

Solução As Figs. 5-28*b* e 5-28*c* são diagramas de corpo isolado para os dois blocos. Como foi dado que $M > m$, é esperado que M desça e m suba. Esta informação nos permite estabelecer os sinais algébricos convenientes para a aceleração dos blocos.

Antes de iniciarmos os cálculos, observemos que a tensão na corda deve ser menor que o peso do bloco M (caso contrário, este bloco não cairia) e maior do que o peso do bloco m (se não, este bloco não subiria). Na Fig. 5-28 estão mostrados os vetores nos dois diagramas de corpo isolado que representam essa situação.

Aplicando a segunda lei de Newton ao bloco de massa m, que tem aceleração a no sentido positivo do eixo y, encontramos

$$T - mg = ma. \qquad (5\text{-}27)$$

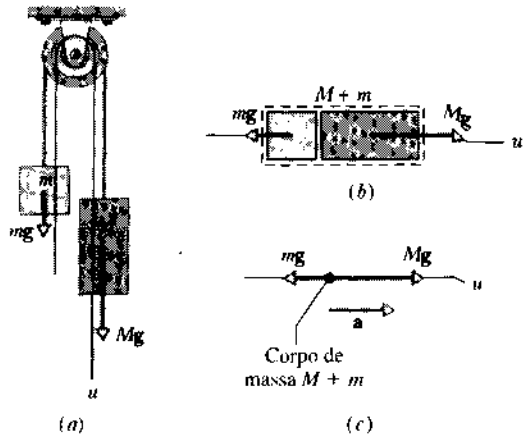


Fig. 5-29 (*a*) Um "eixo" *u* passando pelo sistema da Fig. 5-28. (*b*) Os blocos são reorganizados de forma retilínea em *u* e, depois, tratados como um único corpo de massa $M + m$. (*c*) O diagrama de corpo isolado associado, considerando somente as forças em *u*. Existem apenas duas forças.

Para o bloco de massa *M*, que tem aceleração $-a$, temos

$$T - Mg = -Ma, \tag{5-28}$$

ou

$$-T + Mg = Ma. \tag{5-29}$$

Somando as Eqs. 5-27 e 5-29 (ou eliminando *T* por substituição), obtemos

$$a = \frac{M - m}{M + m} g. \tag{5-30}$$

Substituindo este resultado em 5-27 ou 5-29 e calculando *T*, vem

$$T = \frac{2mM}{M + m} g. \tag{5-31}$$

A Eq. 5-31 pode ser reescrita nas formas equivalentes

$$T = \frac{M + M}{M + m} mg \quad \text{e} \quad T = \frac{m + m}{M + m} Mg. \tag{5-32}$$

A primeira equação mostra que $T > mg$ e a segunda mostra que $T < Mg$. Isto é, a tensão *T* tem um valor intermediário entre os pesos dos dois corpos, conforme acabamos de ver. E mais, se $M = m$, as Eqs. 5-30 e 5-31 estabelecem $a = 0$ e $T = mg = Mg$, como era de se esperar. Ou seja, se os blocos têm a mesma massa, a aceleração deles é zero (os blocos permanecem parados) e a tensão é igual ao peso de cada bloco. (Note que ela *não* é o dobro do peso de cada bloco.)

Substituindo os dados fornecidos, temos

$$a = \frac{M - m}{M + m} g = \frac{2.8 \text{ kg} - 1.3 \text{ kg}}{2.8 \text{ kg} + 1.3 \text{ kg}} (9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$= 3.6 \text{ m/s}^2 \qquad \text{(Resposta)}$$

e

$$T = \frac{2Mm}{M + m} g = \frac{(2)(2.8 \text{ kg})(1.3 \text{ kg})}{2.8 \text{ kg} + 1.3 \text{ kg}} (9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$= 17 \text{ N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Podemos mostrar que o peso de cada bloco é 13 N ($= mg$) e 27 N ($= Mg$). Logo, a tensão (= 17 N) está realmente entre estes dois valores.

EXEMPLO 5-11 — UMA OUTRA MANEIRA* Da mesma forma que fizemos no Exemplo 5-6, vamos refazer o Exemplo 5-11 utilizando um eixo não-convencional *u*.

Solução Consideremos o eixo através do sistema, conforme mostrado na Fig. 5-29*a*. Tornemos este eixo retilíneo, como na Fig. 5-29*b*, e consideremos os blocos como um único corpo de massa $M + m$. Depois, desenhemos o diagrama de corpo livre, como na Fig. 5-29*c*. Observe que há duas forças atuando sobre o sistema de dois blocos ao longo do eixo *u*: $m\mathbf{g}$, no sentido negativo, e $M\mathbf{g}$, no sentido positivo. (A força exercida pela polia na corda é perpendicular ao eixo *u*.) As duas forças no eixo *u* dão a aceleração **a** do sistema (e de cada bloco). A segunda lei de Newton para a componente do movimento em *u* é

$$\sum F_u = Mg - mg = (M + m)a, \tag{5-33}$$

que dá

$$a = \frac{M - m}{M + m} g,$$

conforme anteriormente. Para obter *T*, aplicamos a segunda lei de Newton a cada bloco individualmente, utilizando um eixo *y* convencional, como na solução original. Para o bloco de massa *m*, vamos obter a Eq. 5-27. Substituindo o resultado de *a*, calculado anteriormente na Eq. 5-27, vamos obter a Eq. 5-31.

EXEMPLO 5-12 Um passageiro de massa $m = 72{,}2$ kg está de pé sobre uma balança, dentro de um elevador (Fig. 5-30). Quais as leituras na balança para as acelerações dadas na figura?

Solução Vamos considerar este exemplo do ponto de vista de um observador em um referencial (inercial) fixo em relação à Terra. Façamos esse observador aplicar a segunda lei de Newton à aceleração do passageiro. A Fig. 5-30*a-e* mostra o diagrama de corpo isolado para o passageiro, considerado como uma partícula (alguma partícula!), para as diversas acelerações do elevador.

Apesar da aceleração do elevador, a Terra puxa o passageiro para baixo com uma força de intensidade *mg*, onde $g = 9{,}80$ m/s² é a aceleração em queda livre no referencial inercial da Terra. A balança empurra o passageiro para cima com uma força normal, cuja intensidade *N* é lida na escala da balança. O peso que o passageiro, sob aceleração, julga ter é o que ele lê na balança. Este valor, freqüentemente, é chamado de *peso aparente*, o termo *peso* (ou *peso real*) sendo reservado para a grandeza *mg*.

Pela segunda lei de Newton, temos

$$N - mg = ma,$$

ou

$$N = m(g + a). \tag{5-34}$$

a. Se o elevador permanecer em repouso ou se movimentar com velocidade constante, qual a leitura na balança? (Veja Fig. 5-30*a*.)

Solução Nesse caso, $a = 0$, então,

$$N = m(g + a) = (72{,}2 \text{ kg})(9{,}80 \text{ m/s}^2 + 0)$$

$$= 708 \text{ N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

b. Qual a leitura na balança, se o elevador tiver uma aceleração de 3,20 m/s² para cima? (Veja Fig. 5-30*b*.)

---

*Idem pág. 93.

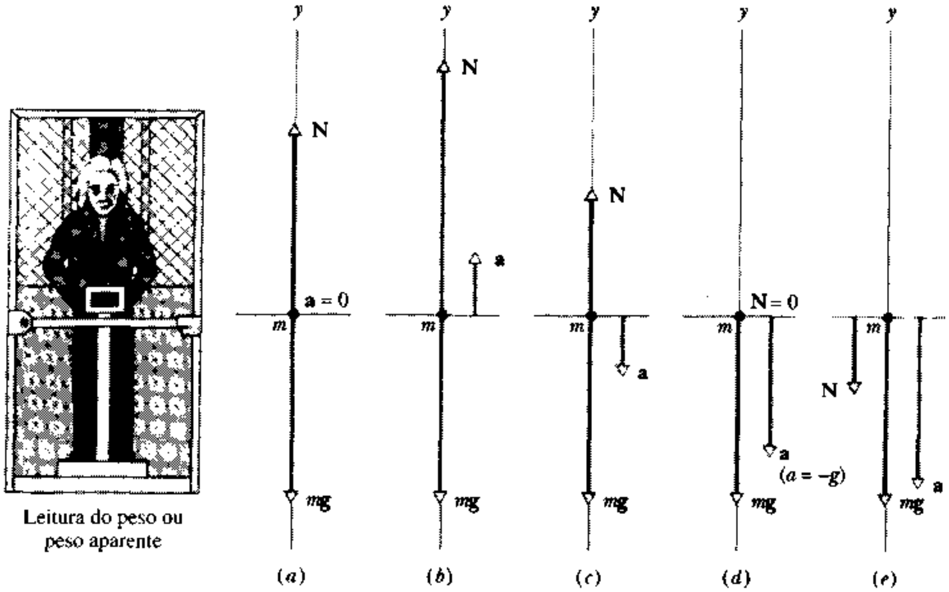


Fig. 5-30 Exemplo 5-12. Um passageiro de massa *m* está dentro de um elevador, sobre uma balança que indica seu peso aparente. (*a*) O diagrama de corpo isolado, quando a aceleração do elevador é nula. (*b*) Para $a = +3{,}20$ m/s². (*c*) Para $a = -3{,}20$ m/s². (*d*) Para $a = -g = -9{,}80$ m/s². (*e*) Para $a = -12{,}0$ m/s².

Solução Uma aceleração para cima significa que o elevador está aumentando a velocidade para cima ou diminuindo-a para baixo. Em qualquer caso, a Eq. 5-34 fornece

$$N = m(g + a) = (72{,}2\ \text{kg})(9{,}80\ \text{m/s}^2 + 3{,}20\ \text{m/s}^2)$$
$$= 939\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

O passageiro pressiona a balança para baixo com uma força maior do que a exercida no repouso. Ele pode concluir — pela leitura da balança — que ganhou 231 N!

c. Qual a leitura na balança, se o elevador tiver uma aceleração de 3,20 m/s² para baixo? (Veja Fig. 5-30*c*.)

Solução Uma aceleração para baixo significa que o elevador está aumentando a velocidade para baixo ou diminuindo-a para cima. A Eq. 5-34 fornece

$$N = m(g + a) = (72{,}2\ \text{kg})(9{,}80\ \text{m/s}^2 - 3{,}20\ \text{m/s}^2)$$
$$= 477\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

O passageiro pressiona a balança para baixo com menos força do que a exercida com o elevador em repouso. Ele parece ter perdido 231 N.

d. Qual a leitura da balança, se o cabo romper e o elevador cair em queda livre? (Veja Fig. 5-30*d*.)

Solução Nesse caso, o passageiro e a balança estão em queda livre, com $a = -g$. Da Eq. 5-34, temos

$$N = m(g + a) = m(g - g) = 0. \qquad \text{(Resposta)}$$

Logo, em queda livre, a leitura da balança indica zero, e o passageiro, em seu referencial acelerado, conclui que não tem peso. Esta é a mesma sensação de perda de peso que os astronautas experimentam na órbita da Terra. Em ambos os casos (passageiro do elevador ou astronauta), o sentimento de perda de peso resulta *não* porque a força gravitacional tenha deixado de atuar — pois ela não deixa — mas porque o veículo (elevador ou cápsula espacial) e seus ocupantes estão, ambos, em queda livre com a *mesma* aceleração.

e. O que aconteceria se o elevador fosse puxado (para baixo) com uma aceleração de $-12{,}0$ m/s²? (Veja Fig. 5-30*e*.)

Solução Essa é uma aceleração maior do que a aceleração da gravidade. Da Eq. 5-34, vem

$$N = m(g + a) = (72{,}2\ \text{kg})(9{,}80\ \text{m/s}^2 - 12{,}0\ \text{m/s}^2)$$
$$= -159\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Se a balança estivesse fixada no chão do elevador e os pés do passageiro presos a ela, a leitura apresentada seria negativa, ou seja, -159 N. Se o passageiro soltasse seus pés, ele subiria dentro do elevador até sua cabeça tocar o teto e empurrá-lo com uma força de 159 N. Observando a partir de um referencial inercial, o passageiro poderia cair em queda livre até sua cabeça tocar o teto.

RESUMO

Mecânica

A velocidade de uma partícula ou de um corpo representado por uma partícula varia — isto é, a partícula acelera — porque há uma ou mais **forças** atuando sobre ela — empurrando ou puxando — devido à interação com outros objetos. A **mecânica** é o estudo das relações entre acelerações e forças. Nesse estudo procuramos descobrir as **leis de força**, com as quais podemos calcular as forças que atuam sobre um corpo, a partir das propriedades deste corpo e do meio no qual se situa.

Força
As intensidades das forças são definidas em termos da aceleração fornecida ao quilograma-padrão. Uma força que imprima uma aceleração de 1 m/s² a um corpo-padrão é definida como uma força de módulo igual a 1 N. A força tem o mesmo sentido da aceleração. As forças são, experimentalmente, consideradas como grandezas vetoriais, de forma que sobre elas operamos de acordo com as regras da álgebra vetorial. A **força resultante** em um corpo é a soma vetorial de todas as forças que atuam naquele corpo.

Massa
A **massa** m de um corpo é a característica que relaciona a sua aceleração com a força (ou força resultante) que causa essa aceleração. A massa é uma grandeza escalar.

Primeira Lei de Newton
Se a força resultante sobre um corpo é nula, ele deve permanecer em repouso ou em movimento retilíneo com velocidade constante, conforme esteja em repouso ou em movimento, respectivamente. Para este corpo, há um sistema de referência chamado de *referencial inercial*, no qual sua aceleração **a** vem a ser zero. Medidas de **a**, em relação a outros referenciais não-inerciais, indicarão uma força inexistente sobre o corpo.

Segunda Lei de Newton
A força resultante $\sum \mathbf{F}$ sobre um corpo de massa m está relacionada com a sua aceleração **a** por

$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}, \tag{5-1}$$

que pode ser escrita em suas componentes escalares:

$$\sum F_x = ma_x, \quad \sum F_y = ma_y, \quad \text{e} \quad \sum F_z = ma_z. \tag{5-2}$$

Em unidades SI, a segunda lei indica que

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

O **diagrama de corpo isolado** é útil na resolução de problemas utilizando a segunda lei de Newton: é um diagrama detalhado no qual somente *um* corpo é considerado. Este corpo é representado por um ponto. As forças externas sobre o corpo são representadas como vetores e um sistema de coordenadas é estabelecido, orientado de forma a simplificar a solução.

Algumas Forças Específicas
O **peso P** de um corpo é a força que atua sobre o corpo devido à interação deste corpo com o corpo astronômico mais próximo:

$$\mathbf{P} = m\mathbf{g}, \tag{5-8}$$

onde **g** é o vetor aceleração da gravidade. Geralmente, esse corpo astronômico é a Terra.

A **força normal N** é a força exercida sobre um corpo pela superfície contra a qual ele é pressionado. A força normal é sempre perpendicular a esta superfície.

A **força de atrito f** é a força exercida sobre um corpo, quando este desliza ou tenta deslizar sobre uma superfície. A força é paralela à superfície e se opõe ao movimento do corpo. Uma **superfície sem atrito** é aquela na qual a força de atrito é desprezível.

A **tensão** (ou tração) **T** é a força exercida por uma corda esticada sobre um corpo, no ponto de conexão. A força é direcionada para fora do corpo, ao longo da corda. Para cordas **sem massa** (sua massa é desprezível) a tensão, em ambas as extremidades da corda, tem a mesma magnitude T, mesmo que a corda passe ao redor de uma **polia sem massa e sem atrito** (sua massa é desprezível e o atrito em seu eixo é desconsiderado).

Terceira Lei de Newton
Se o corpo A exerce uma força $\mathbf{F}_{BA}$ sobre o corpo B, então B deve exercer uma força $\mathbf{F}_{AB}$ sobre o corpo A. As forças têm o mesmo módulo e sentidos contrários:

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}. \tag{5-12}$$

Essas forças atuam em corpos *diferentes*.

QUESTIONÁRIO

1. Se você estiver em pé, voltado para a frente, dentro de um ônibus ou metrô em movimento, por que uma rápida desaceleração faz você tombar para a frente e uma rápida aceleração joga você para trás? Por que, se ficar voltado para a lateral do ônibus ou metrô, você tem um melhor equilíbrio?

2. Usando a primeira lei de Newton, explique o que acontece a uma criança, sentada no banco dianteiro de um carro, sem usar o cinto de segurança, quando o motorista pisa no freio, de repente. Ao invés disso, suponha que a criança está no colo de um adulto que não faz uso do cinto de segurança; se o carro parar de repente, a criança fica segura nos braços do adulto ou, na realidade, corre mais perigo? O que acontece com uma pessoa que viaja na carroceria de um caminhão, se o veículo parar repentinamente?

3. Um bloco de massa m está preso ao teto por um cordão C, e um outro cordão D está preso ao fundo do bloco (Fig. 5-31). Explique: se for dado um rápido puxão em D ele arrebentará; mas se aumentarmos a tração em D progressivamente, C arrebentará.

4. Se duas forças atuam num corpo em movimento, há alguma maneira do corpo se mover com (a) velocidade escalar constante ou (b) com velocidade constante? De alguma forma a velocidade poderia ser zero (c) por um instante ou (d) continuamente?

5. O manual do proprietário de um determinado carro sugere que o cinto de segurança deve ser ajustado "para prender confortavelmente" e que

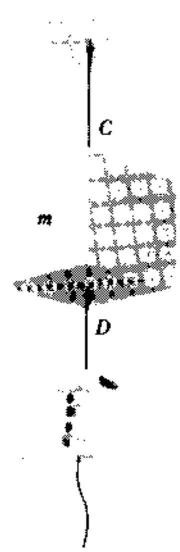


Fig. 5-31 Questão 3.

o apoio de cabeça do banco dianteiro *não* deve apoiar confortavelmente a parte de trás do pescoço, ele deve ser ajustado de forma que "o alto do encosto fique na altura de suas orelhas". Explique o bom senso dessas instruções em função das leis de Newton.

6. Um francês, ao preencher um formulário, escreve "78 kg" na lacuna marcada *Poids* (peso). Entretanto, peso é uma força e quilograma é uma unidade de massa. O que o francês (entre outros) tem em mente, quando usa uma unidade de massa para informar o seu peso? Por que ele não informa o seu peso em newtons? Quantos newtons o francês pesa? Quantas libras?

7. Qual a sua massa em slugs? Qual o seu peso em newtons?

8. Usando a força, o comprimento e o tempo como grandezas fundamentais, determine as dimensões da massa.

9. Um cavalo é obrigado a puxar uma carroça. Ele refuga e invoca, em sua defesa, a terceira lei de Newton: a força do cavalo sobre a carroça é *igual e de sentido contrário* à força da carroça sobre o cavalo. "Se eu não posso exercer sobre a carroça uma força maior do que a que ela exerce sobre mim, como posso colocar a carroça em movimento?" — pergunta o cavalo. Como você responderia?

10. Comentar se os seguintes pares de força são exemplos de ação e reação: (a) A Terra atrai um tijolo; o tijolo atrai a Terra. (b) A turbina de um avião empurra o ar em direção à cauda; o ar empurra o avião para a frente. (c) Um cavalo puxa uma carroça para frente, movimentando-a; a carroça puxa o cavalo para trás. (d) Um cavalo puxa uma carroça para frente, sem movimentá-la; a carroça puxa o cavalo para trás. (e) Um cavalo puxa uma carroça para a frente, sem movimentá-la; a Terra exerce uma força igual e de sentido oposto sobre a carroça. (f) A Terra puxa a carroça para baixo; o chão empurra a carroça para cima com a mesma força e sentido oposto.

11. Comente, de acordo com as afirmativas abaixo sobre peso e massa, extraídas de provas. (a) Massa e peso são as mesmas quantidades físicas expressas em diferentes unidades. (b) Massa é uma propriedade de um único objeto, enquanto o peso resulta de uma interação de dois objetos. (c) o peso de um objeto é proporcional à sua massa. (d) A massa de um corpo varia de acordo com mudanças em seu peso local.

12. Descreva várias maneiras pelas quais você poderia experimentar, mesmo que rapidamente, a ausência de peso.

13. O braço mecânico de um ônibus espacial pode ser esticado até 12 m e manipular um satélite de 2.200 kg. Contudo, no solo, este sistema manipulador remoto (RMS) não suporta seu próprio peso. Por que o RMS seria capaz de exercer qualquer força nas condições de ausência de peso em órbita?

14. Na Fig. 5-32 há quatro forças de intensidade igual. Você pode fazer com que três delas, atuando sobre um corpo, o mantenham em velocidade constante?

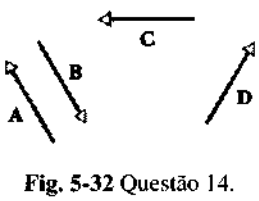


Fig. 5-32 Questão 14.

15. Um elevador é suportado por um único cabo. Não existe contrapeso. O elevador transporta passageiros do térreo ao nível superior, onde esses passageiros desembarcam, dando lugar a novos passageiros, que são levados ao térreo. Em que momento, dessa viagem de ida e volta, a tensão no cabo é igual ao peso do elevador mais o dos passageiros? Quando ela é maior? Quando é menor?

16. Você está na plataforma do ônibus espacial *Discovery*, num vôo orbital, e alguém lhe passa duas bolas de madeira aparentemente idênticas. Uma delas, entretanto, tem um núcleo de chumbo. Descreva as várias maneiras de distingui-las.

17. Você é um astronauta na sala de estar de uma estação espacial em órbita e remove a tampa de uma jarra fina e comprida que contém uma única azeitona. Descreva diversas maneiras de remover a azeitona da jarra — sempre tirando proveito da massa da jarra ou da azeitona.

18. Uma força horizontal é aplicada a um corpo que pode se mover livremente. Tal força consegue acelerar o corpo, se for menor do que o seu peso?

19. Por que a aceleração de um objeto em queda livre não depende do seu peso?

20. Qual a relação — se houver — entre a força aplicada a um objeto e o sentido no qual ele se move?

21. Um pássaro pousa num fio telegráfico esticado. Isto muda o tensionamento no fio? Se mudar, esta variação é menor, igual ou maior do que o peso do pássaro?

22. Em novembro de 1984, os astronautas Joe Allen e Dale Gardner resgataram, no espaço, o satélite de comunicação *Westar-6* e o colocaram no compartimento de carga do ônibus espacial *Discovery*; veja Fig. 5-33. Ao descrever a experiência sobre o satélite, Joe Allen falou: "Ele não é pesado; é massivo." O que ele quis dizer?

Fig. 5-33 Questão 22. Os astronautas Joe Allen e Dale Gardner.

23. Num cabo-de-guerra, três homens puxam uma corda no ponto A para a esquerda, e três homens puxam no ponto B para a direita, com a mesma força. Nessa situação, um peso de 2 kg é pendurado no centro da corda. (a) Os homens conseguem manter a corda AB na horizontal? (b) Se negativo, explique. Se positivo, determine as intensidades das forças em A e B necessárias para isso.

24. A seguinte afirmação é verdadeira; explique-a. Duas equipes disputam um cabo-de-guerra; a equipe que empurra com mais força (horizontalmente) contra o solo é a vencedora.

25. Uma corda sem massa está suspensa por uma polia sem atrito. Um macaco está pendurado numa das extremidades da corda e, na outra, um espelho, com o mesmo peso, na mesma altura do macaco. Este se afasta da sua imagem no espelho (a) subindo pela corda, (b) descendo pela corda ou (c) se soltando da corda?

26. Você está de pé em cima da plataforma de uma balança de mola e observa o seu peso. Quando dá um passo sobre esta balança, observa que seu peso é menor no início do passo e maior no final. Explique.

27. Poderíamos nos pesar numa balança cuja leitura máxima fosse menor que o nosso peso? Em caso afirmativo, como?

28. Um peso está suspenso por um cordão no alto do teto de um elevador. Ordene as seguintes situações, de acordo com as tensões produzidas no cordão, listando primeiro a maior: (a) elevador em repouso; (b) elevador subindo com velocidade constante; (c) elevador descendo com desaceleração; (d) elevador descendo acelerado.

29. Uma mulher está em pé sobre uma balança de mola, dentro de um elevador. Ordene as situações de acordo com a leitura da escala da balança, listando primeiro a de maior leitura: (a) elevador parado; (b) rompimento do cabo do elevador (queda livre); (c) elevador acelerando para cima; (d) elevador acelerando para baixo; (e) elevador se movendo em velocidade constante.

30. Sob que condições diferentes massas podem ficar suspensas numa polia, sem fazê-la se mover.

31. Em cada extremidade do cabo de uma vassoura foi colocada uma agulha e a ponta de cada uma foi apoiada na borda de duas finas taças com vinho, conforme mostrado na Fig. 5-34. Um homem desfere, sobre o cabo de vassoura, um rápido e violento golpe com um sólido bastão. O cabo de vassoura quebra e cai ao chão, mas as taças de vinho permanecem no mesmo lugar e nenhum vinho é derramado. Esta impressionante demonstração pública tornou-se popular no final do último século. Qual a física que está por trás disso? (Se quiser tentar, pratique primeiro com latas de refrigerante vazias.)

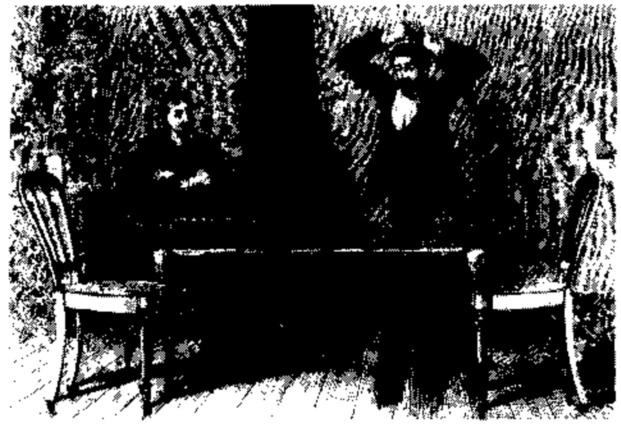


Fig. 5-34 Questão 31.

EXERCÍCIOS E PROBLEMAS

Seção 5-3 Força

1E. Se o corpo padrão de 1 kg tem uma aceleração de 2,00 m/s², fazendo um ângulo de 20° com o semi-eixo positivo x, então, (a) quais são as componentes x e y da força resultante sobre o corpo e (b) qual a força resultante, em notação de vetores unitários?

2E. Se o corpo padrão de 1 kg é acelerado por $\mathbf{F}_1 = (3{,}0\text{ N})\,\mathbf{i} + (4{,}0\text{ N})\,\mathbf{j}$ e $\mathbf{F}_2 = (-2{,}0\text{ N})\,\mathbf{i} + (-6{,}0\text{ N})\,\mathbf{j}$, então, (a) qual a força resultante, em notação de vetores unitários, e qual o módulo e o sentido (b) da força resultante e (c) da aceleração?

3P. Suponha que o corpo padrão de 1 kg é acelerado a 4,00 m/s², fazendo um ângulo de 160° com o semi-eixo positivo x, devido a duas forças, sendo uma delas $\mathbf{F}_1 = (2{,}50\text{ N})\,\mathbf{i} + (4{,}60\text{ N})\,\mathbf{j}$. Qual é a outra força em (a) notação de vetores unitários e (b) módulo e sentido?

Seção 5-5 Segunda Lei de Newton

4E. Duas forças são aplicadas sobre uma partícula que se move continuamente com velocidade $\mathbf{v} = (3\text{ m/s})\,\mathbf{i} - (4\text{ m/s})\,\mathbf{j}$. Uma das forças é $\mathbf{F}_1 = (2\text{ N})\,\mathbf{i} + (-6\text{ N})\,\mathbf{j}$. Qual é a outra força?

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

6E. Na caixa de 2,0 kg, da Fig. 5-35, são aplicadas duas forças, mas somente uma é mostrada. A caixa se move exatamente sobre o eixo x.

Fig. 5-35 Exercício 6.

Determine a segunda força para os seguintes valores da componente a_x da aceleração da caixa: (a) 10 m/s², (b) 20 m/s², (c) 0, (d) −10 m/s² e (e) −20 m/s².

7E. Na caixa de 2,0 kg, da Fig. 5-36, são aplicadas duas forças, mas somente uma é mostrada. A aceleração da caixa também é mostrada na figura. Determine a segunda força (a) em notação de vetores unitários e (b) em módulo e sentido.

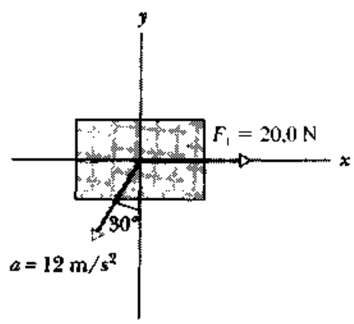


Fig. 5-36 Exercício 7.

8E. Cinco forças são aplicadas sobre uma caixa de 4,0 kg, conforme a Fig. 5-37. Determine a aceleração da caixa (a) em notação de vetores unitários e (b) em módulo e sentido.

9P. Três astronautas, movidos por mochilas jato-propulsadas, guiam um asteróide de 120 kg empurrando-o para uma doca de processamento, aplicando as forças mostradas na Fig. 5-38. Qual é a aceleração do asteróide (a) em notação de vetores unitários e (b) em módulo e sentido?

10P. A Fig. 5-39 é uma vista de cima de um pneu de 12 kg puxado por três cordas. Uma força está indicada ($\mathbf{F}_1$, com módulo de 50 N). Oriente

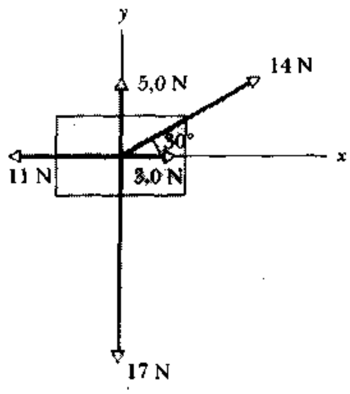


Fig. 5-37 Exercício 8.

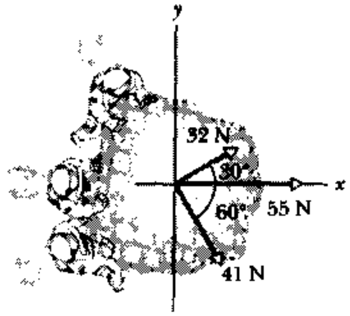


Fig. 5-38 Problema 9.

as outras duas forças, $\mathbf{F}_2$ e $\mathbf{F}_3$, de forma que o módulo da aceleração resultante seja o menor, e determine o módulo se (a) $F_2 = 30$ N, $F_3 = 20$ N; (b) $F_2 = 30$ N, $F_3 = 10$ N; e (c) $F_2 = F_3 = 30$ N.

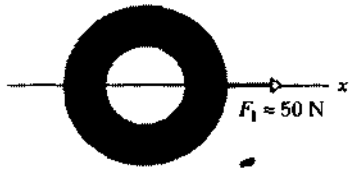


Fig. 5-39 Problema 10.

Seção 5-6 Algumas Forças Específicas

11E. Quais são a massa e o peso de (a) um trenó de 630 kg e (b) de uma bomba térmica de 421 kg?

12E. Quais são o peso em newtons e a massa em quilogramas de (a) um saco de açúcar de 2,25 kg, (b) um jogador de 108 kg e (c) um automóvel de 1,8 ton?

13E. Um astronauta com 75 kg de massa deixa a Terra. Calcule seu peso (a) na Terra, (b) em Marte, onde $g = 3{,}8$ m/s^2, e (c) no espaço interplanetário, onde $g = 0$. (d) Qual a sua massa em cada um desses locais?

14E. Uma determinada partícula tem um peso de 22 N num ponto onde $g = 9{,}8$ m/s^2. (a) Quais são o peso e a massa da partícula, se ela for para um ponto do espaço onde $g = 4{,}9$ m/s^2? (b) Quais são o peso e a massa da partícula, se ela for deslocada para um ponto do espaço onde a aceleração de queda livre seja nula?

15E. Um pingüim com 15,0 kg de massa está sobre uma balança de banheiro (Fig. 5-40). Qual (a) o peso **P** do pingüim e (b) a força normal **N** sobre o pingüim? (c) Qual a leitura da balança, supondo que ela está calibrada em unidades de peso?

Fig. 5-40 Exercício 15.

16E. Um móbile grosseiro pende de um teto com duas peças metálicas presas por uma corda de massa desprezível, conforme a Fig. 5-41. São dadas as massas das peças. Qual a tensão (a) na corda inferior e (b) na corda superior?

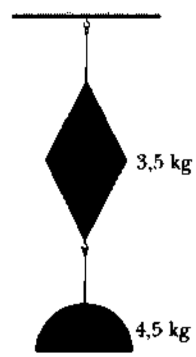


Fig. 5-41 Exercício 16.

17E. A Fig. 5-42 mostra um móbile de três peças, preso por uma corda de massa desprezível. São dadas as massas das peças superior e inferior. A tensão no topo da corda é 199 N. Qual a tensão (a) no pedaço inferior da corda e (b) no trecho médio da corda?

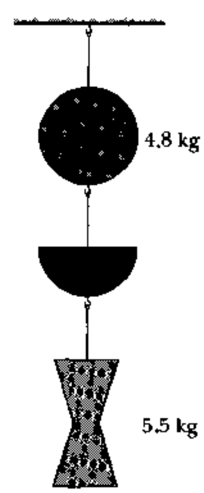


Fig. 5-42 Exercício 17.

18E. (a) Um salame de 11,0 kg está preso por uma corda a uma balança de mola, que está presa ao teto por outra corda (Fig. 5-43*a*). Qual a leitura na balança? (b) Na Fig. 5-43*b*, o salame está suspenso por uma corda que passa por uma roldana e se prende a uma balança de mola que, por sua vez, está presa à parede por outra corda. Qual a leitura na balança? (c) Na Fig. 5-43*c*, a parede foi substituída por um outro salame de 11,0 kg, à esquerda, e o conjunto ficou equilibrado. Qual a leitura na balança agora?

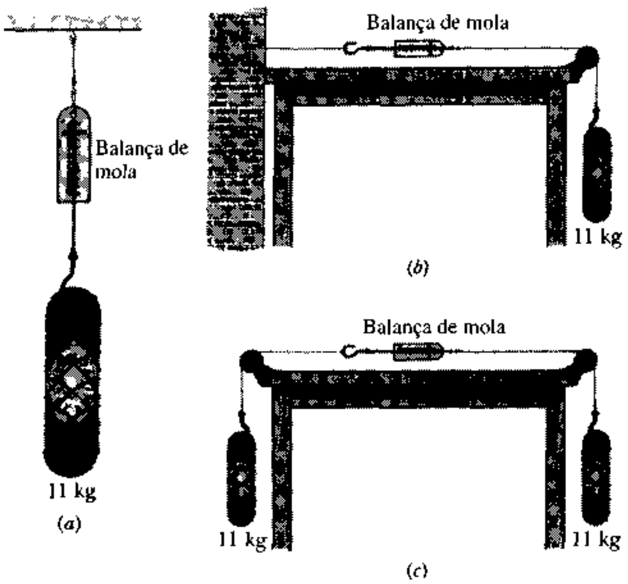


Fig. 5-43 Exercício 18.

Seção 5-8 Aplicação das Leis de Newton

19E. Quando um avião está em vôo nivelado, seu peso é equilibrado por uma "sustentação" vertical, que é uma força exercida pelo ar. Com que intensidade esta força atua sobre o avião nessa condição, se sua massa é $1{,}20 \times 10^3$ kg?

20E. Qual a intensidade da força resultante aplicada a um automóvel de 1,7 ton, com aceleração de 3,6 m/s^2?

21E. Um foguete experimental pode partir do repouso e alcançar a velocidade de 1.600 km/h em 1,8 s, com aceleração constante. Qual a intensidade da força média necessária, se a massa do veículo é 500 kg?

22E. Um carro se movendo a 53 km/h bate num pilar de uma ponte. Um passageiro é lançado a uma distância de 65 cm para a frente (em relação à estrada), enquanto sua vida é salva por uma bolsa inflável de ar. Qual a intensidade da força (suposta constante) aplicada à parte superior do tronco do passageiro, que tem 41 kg de massa?

23E. Se um nêutron livre é capturado por um núcleo, ele pode ser parado no interior do núcleo por uma *força forte*. Esta força, que mantém o núcleo coeso, é nula fora do núcleo. Suponha que um nêutron livre com velocidade inicial de $1{,}4 \times 10^7$ m/s acaba de ser capturado por um núcleo com diâmetro $d = 1{,}0 \times 10^{-14}$ m. Admitindo que a força sobre o nêutron é constante, determine a sua intensidade. A massa do nêutron é $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg.

24E. O feixe de luz do canhão laser de um satélite atinge um míssil balístico, acidentalmente lançado (Fig. 5-44). O feixe exerce uma força de $2{,}5 \times 10^{-5}$ N sobre o míssil. Se o "tempo de incidência" do feixe sobre o míssil for 2,3 s, de quanto o míssil será deslocado de sua trajetória se tiver (a) uma ogiva de 280 kg e (b) um chamariz de 2,1 kg? (Esses deslocamentos podem ser medidos pela observação do feixe refletido.)

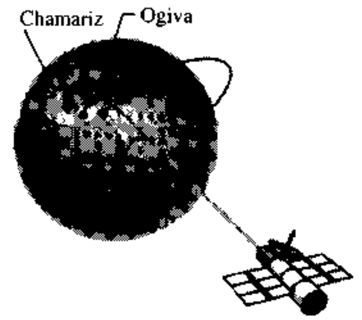


Fig. 5-44 Exercício 24.

25E. Num jogo de cabo-de-guerra modificado, duas pessoas puxam em sentidos opostos, não uma corda, mas um trenó de 25 kg parado numa estrada congelada. Se as pessoas exercerem forças de 90 N e 92 N, qual será o módulo da aceleração do trenó?

26E. Uma motocicleta de 202 kg alcança 90 km/h em 6,0 s, a partir do repouso. (a) Qual o módulo da sua aceleração? (b) Qual o módulo da força resultante sobre ela (suposta constante)?

27E. Com base na Fig. 5-20, suponha que as duas massas são $m = 2{,}0$ kg e $M = 4{,}0$ kg. (a) Descubra, sem qualquer cálculo, qual delas deve estar suspensa para o módulo da aceleração ser máximo. Quais são (b) o módulo e (c) a tensão na corda?

28E. Veja a Fig. 5-27. Vamos considerar a massa do bloco igual a 8,5 kg e o ângulo $\theta = 30°$. Determine (a) a tensão na corda e (b) a força normal aplicada sobre o bloco. (c) Determine o módulo da aceleração do bloco, se a corda for cortada.

29E. Um avião a jato, parado numa pista, inicia a decolagem acelerando a 2,3 m/s^2. Ele tem duas turbinas, que exercem uma força (de empuxo) de $1{,}4 \times 10^5$ N, cada uma, sobre o avião. Qual o peso do avião?

30E. O "iate solar" *Sunjamming* é um veículo espacial com uma grande vela, que é impulsionado pela luz do Sol. Embora esta propulsão seja muito pequena nas atuais circunstâncias, é suficientemente grande para afastar o veículo espacial do Sol a custo zero. Suponha que essa espaçonave tenha 900 kg de massa e receba uma força de 20 N. (a) Qual o módulo da aceleração resultante? Se o veículo parte do repouso, (b) qual a distância que ele viaja em 1 dia e (c) qual será a sua velocidade?

31E. A tensão na qual uma linha de pesca arrebenta é, geralmente, chamada de "resistência" da linha. Qual a resistência mínima necessária para uma linha que pára, num espaço de 11,0 cm, um salmão de 8,5 kg, se o peixe está nadando com uma velocidade de 2,8 m/s? Admita uma desaceleração constante.

32E. Um elétron percorre uma trajetória retilínea de exatamente 1,5 cm, entre o "catodo" e o "anodo" de uma "válvula eletrônica". Ele parte com velocidade igual a zero e alcança o anodo com velocidade de $6{,}0 \times 10^6$ m/s. (a) Admita que a aceleração é constante e calcule o módulo da força sobre o elétron. (A força é elétrica, mas este dado não é necessário.) A massa do elétron é $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg. (b) Calcule o peso do elétron.

33E. Um elétron é lançado horizontalmente com velocidade de $1{,}2 \times 10^7$ m/s no interior de um campo elétrico, que exerce sobre ele uma força vertical constante de $4{,}5 \times 10^{-16}$ N. A massa do elétron é $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg. Determine a distância vertical de deflexão do elétron, no intervalo de tempo em que ele percorre 30 mm, horizontalmente.

34E. Um carro que pesa $1,30 \times 10^4$ N está se movendo, inicialmente, com uma velocidade de 40 km/h, quando os freios são aplicados e ele pára após 15 m. Supondo que o carro é parado por uma força constante, determine (a) a magnitude desta força e (b) o tempo necessário para mudar a velocidade. Se, por outro lado, a velocidade inicial dobrar e o carro for submetido à mesma força durante a parada, qual (c) a distância de frenagem e (d) a variação do tempo de parada? (Isto poderá servir como lição acerca do perigo de se dirigir em altas velocidades.)

35E. Calcule a aceleração inicial de subida de um foguete com $1,3 \times 10^4$ kg de massa, se a força inicial de subida, produzida pelos seus motores (o empuxo), é $2,6 \times 10^5$ N. O peso do foguete não deve ser desprezado.

36E. Um foguete e sua carga têm uma massa total de $5,0 \times 10^4$ kg. Qual a magnitude da força produzida pelo motor (o empuxo) quando (a) o foguete está "planando" sobre a plataforma de lançamento, logo após a ignição, e (b) o foguete está acelerando para cima a 20 m/s²?

37P. Um bombeiro de 72 kg desliza num poste vertical, diretamente para baixo, com uma aceleração de 3 m/s². Quais são os módulos e sentidos das forças verticais (a) exercidas pelo poste sobre o bombeiro e (b) exercidas pelo bombeiro sobre o poste?

38P. Uma esfera de massa $3,0 \times 10^{-4}$ kg está suspensa por uma corda. Uma brisa horizontal constante empurra a esfera de maneira que ela faça um ângulo de 37° com a vertical de repouso da mesma. Determine (a) a intensidade da força aplicada e (b) a tensão na corda.

39P. Uma moça de 40 kg e um trenó de 8,4 kg estão sobre a superfície de um lago gelado, separados por 15 *m*. A moça aplica sobre o trenó uma força horizontal de 5,2 N, puxando-o por uma corda, em sua direção. (a) Qual a aceleração do trenó? (b) Qual a aceleração da moça? (c) A que distância, em relação à posição inicial da moça, eles se juntam, supondo nulas as forças de atrito?

40P. Dois blocos estão em contato sobre uma mesa sem atrito. Uma força horizontal é aplicada a um dos blocos, como mostrado na Fig. 5-45. (a) Se $m_1 = 2,3$ kg, $m_2 = 1,2$ kg e $F = 3,2$ N, determine a força de contato entre os dois blocos. (b) Mostre que, se a mesma força F for aplicada a m_2, ao invés de m_1, a força de contato entre os dois blocos é 2,1 N, que não é o mesmo valor obtido em (a). Explique a diferença.

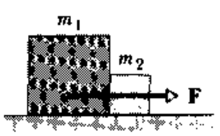


Fig. 5-45 Problema 40.

41P. Um trabalhador arrasta um caixote pelo chão de uma fábrica, puxando-o por uma corda (Fig. 5-46). Ele exerce sobre a corda, que faz um ângulo de 38° com a horizontal, uma força de 450 N, e o chão exerce uma força horizontal de 125 N que se opõe ao movimento. Calcule a aceleração do caixote (a) se sua massa for 310 kg e (b) se seu peso for 310 N.

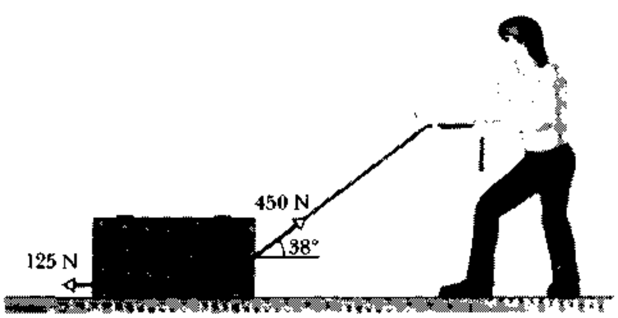


Fig. 5-46 Problema 41.

42P. Você puxa um pequeno refrigerador com uma força constante **F** através de um chão lubrificado (sem atrito), com **F** horizontal (caso 1) ou com **F** inclinada para cima com um ângulo θ (caso 2). (a) Qual a razão entre a velocidade do refrigerador, no caso 2, e sua velocidade no caso 1, se ele for puxado *por um certo tempo T*? (b) Qual é esta razão, se for puxado por uma certa distância d ?

43P. Um tatu de 12 kg corre, por divertimento, por cima de um grande lago gelado de superfície plana, sem atrito, com velocidade inicial de 5,0 m/s, no sentido positivo do eixo x. Considere sua posição inicial sobre o gelo como sendo a origem. Ele escorrega sobre o gelo, enquanto é empurrado por um vento de força igual a 17 N, no sentido positivo do eixo y. Usando a notação de vetores unitários, quais são (a) seu vetor velocidade e (b) seu vetor posição, depois de ter deslizado por 3,0 s?

44P. Um elevador e sua carga, juntos, têm massa de 1.600 kg. Determine a tensão no cabo de sustentação, quando o elevador, inicialmente descendo a 12 m/s, é parado numa distância de 42 m com aceleração constante.

45P. Um objeto está pendurado numa balança de mola presa ao teto de um elevador. A balança marca 65 N, quando o elevador ainda está parado. (a) Qual a indicação na balança, quando o elevador está subindo com uma velocidade constante de 7,6 m/s? (b) Qual a indicação na balança, quando o elevador, subindo com uma velocidade de 7,6 m/s, é desacelerado à razão de 2,4 m/s²?

46P. Um motor a jato de 1.400 kg é fixado à fuselagem de um avião de passageiros por apenas três parafusos (esta é a prática usual). Suponha que cada parafuso suporte um terço da carga. (a) Calcule a força em cada parafuso, enquanto o avião espera na pista para decolar. (b) Durante o vôo, o avião enfrenta turbulência que, de repente, implica numa aceleração vertical para cima de 2,6 m/s². Calcule a força em cada parafuso, nesta condição.

47P. Na Fig. 5-47, um helicóptero de 15.000 kg está levantando um caminhão de 4.500 kg, com uma aceleração para cima de 1,4 m/s². Calcule (a) a força que o ar exerce nas pás das hélices e (b) a tensão na parte superior do cabo.

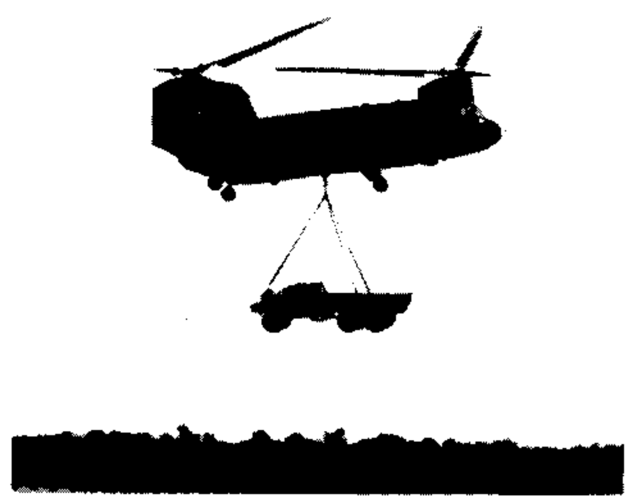


Fig. 5-47 Problema 47.

48P. Um homem de 80 kg pula para um pátio, da beirada de uma janela que está a apenas 0,50 m acima do solo. Ele esqueceu de dobrar seus joelhos, quando aterrissou, e o seu movimento cessou numa distância de 2,0 cm. (a) Qual a aceleração média do homem, entre o primeiro instante em que seus pés tocaram o chão, ao instante em que ficou completamente parado? (b) Qual a força que o pulo transmitiu à sua estrutura óssea?

49P. Três blocos são conectados, como na Fig. 5-48, sobre uma mesa horizontal, sem atrito, e puxados para a direita com uma força $T_3 = 65{,}0$ N. Se $m_1 = 12{,}0$ kg, $m_2 = 24{,}0$ kg e $m_3 = 31{,}0$ kg, calcule (a) a aceleração do sistema e (b) as tensões T_1 e T_2.

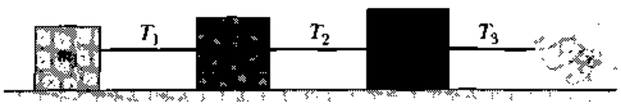


Fig. 5-48 Problema 49.

50P. A Fig. 5-49 mostra quatro pingüins que estão sendo puxados pelo tratador, de brincadeira, sobre uma superfície de gelo escorregadia (sem atrito). São dadas as massas de três pingüins e a tensão em dois trechos da corda. Determine a massa que não foi dada.

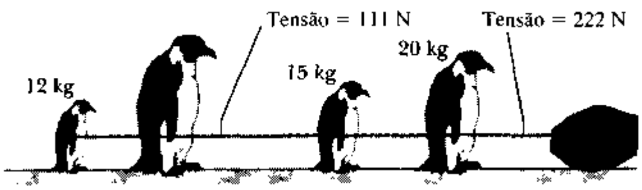


Fig. 5-49 Problema 50.

51P. Um elevador pesando 2.800 kg é puxado para cima, por um cabo, com uma aceleração de 1,2 m/s². (a) Calcule a tensão no cabo. (b) Qual a tensão no cabo, quando o elevador, ainda subindo, desacelera a 1,2 m/s²?

52P. Uma pessoa de 80 kg salta de pára-quedas e experimenta uma aceleração, para baixo, de 2,5 m/s². O pára-quedas tem 5,0 kg de massa. (a) Qual a força exercida, para cima, pelo ar sobre o pára-quedas? (b) Qual a força exercida, para baixo, pela pessoa sobre o pára-quedas?

53P. Um homem de 85 kg desce de uma altura de 10,0 m preso a uma corda que passa por uma polia, sem atrito, e tem na outra extremidade um saco de areia de 65 kg. (a) Partindo do repouso, com que velocidade o homem chega ao solo? (b) Ele poderia fazer alguma coisa para reduzir a velocidade com que chega ao solo?

54P. Um novo jato naval americano de 26 ton (Fig. 5-50) necessita de uma velocidade de vôo de 84 m/s para decolar. Sua turbina desenvolve uma força máxima de 10.800 kgf, que é insuficiente para fazê-lo decolar nos 90 m de pista disponíveis em um porta-aviões. Qual a força mínima necessária (suposta constante) na catapulta que é usada para auxiliar o lançamento do jato? Admita que a catapulta e a turbina do avião exerçam, individualmente, uma força constante nos 90 m de pista.

Fig. 5-50 Problema 54.

55P. Imagine um módulo de aterrissagem se aproximando da superfície de Callisto, uma das luas de Júpiter. Se o motor fornece uma força para cima (empuxo) de 3.260 N, o módulo desce com velocidade constante; se o motor fornece apenas 2.200 N, o módulo desce com uma aceleração de 0,39 m/s². (a) Qual o peso do módulo de aterrissagem nas proximidades da superfície de Callisto? (b) Qual a massa do módulo? (c) Qual a aceleração em queda livre, próxima à superfície de Callisto?

56P. Um artista de circo de 52 kg escorrega por uma corda, que arrebentará se a tensão exceder 425 N. (a) O que acontece se o artista ficar pendurado na corda? (b) Qual a intensidade da aceleração mínima permitida ao artista para evitar o rompimento da corda?

57P. Uma corrente formada por cinco elos, com massa de 0,100 kg cada um, é levantada verticalmente com uma aceleração constante de 2,50 m/s², como mostrado na Fig. 5-51. Determine (a) as forças que atuam entre elos adjacentes, (b) a força **F** exercida sobre o elo superior pela pessoa que levanta a corrente e (c) a força *resultante* que acelera cada elo.

Fig. 5-51 Problema 57.

58P. Um bloco de massa $m_1 = 3{,}70$ kg está sobre um plano com 30,0° de inclinação, sem atrito, preso por uma corda que passa por uma polia, de massa e atrito desprezíveis, e tem na outra extremidade um segundo bloco de massa $m_2 = 2{,}30$ kg, pendurado verticalmente (Fig. 5-52). Quais são (a) os módulos das acelerações de cada bloco e (b) o sentido da aceleração de m_2? (c) Qual a tensão na corda?

Fig. 5-52 Problema 58.

59P. Você precisa levar para o chão uma sucata de material de construção de telhado que pesa 45 kg, utilizando uma corda que arrebentará se a tensão exceder 39 kg. (a) Como você pode evitar o rompimento da corda durante a descida? (b) Se a altura é 6 m e você não consegue evitar o rompimento da corda, com que velocidade a sucata de material baterá no chão?

60P. Um bloco é lançado para cima sobre um plano inclinado, sem atrito, com velocidade inicial v_0. O ângulo de inclinação é θ. (a) Que distância ao longo do plano ele alcança? (b) Quanto tempo leva para chegar até lá? (c) Qual a sua velocidade, quando retorna e chega embaixo? Calcule numericamente as respostas para $\theta = 32{,}0°$ e $v_0 = 3{,}50$ m/s.

61P. Uma lâmpada pende verticalmente de uma corda num elevador que desce com uma desaceleração de 2,4 m/s². (a) Se a tensão na corda é 89 N, qual a massa da lâmpada? (b) Qual a tensão na corda, quando o elevador sobe com uma aceleração para cima de 2,4 m/s²?

62P. Um caixote de 100 kg é empurrado para cima com velocidade constante, sobre uma rampa com inclinação de 30,0° e de atrito desprezível, conforme mostrado na Fig. 5-53. (a) Qual a força horizontal **F** necessária? (b) Qual a força exercida pela rampa sobre o caixote?

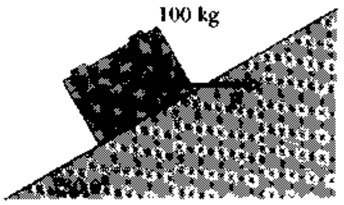


Fig. 5-53 Problema 62.

63P. Um macaco de 10 kg sobe por uma corda de massa desprezível, que passa sobre o galho de uma árvore, sem atrito, e tem presa na outra extremidade uma caixa de 15 kg, que está no solo (Fig. 5-54). (a) Qual o módulo da aceleração mínima que o macaco deve ter para levantar a caixa do solo? Se, após levantar a caixa, o macaco parar de subir e ficar agarrado à corda, quais são (b) sua aceleração e (c) a tensão na corda?

Fig. 5-54 Problema 63.

64P. A Fig. 5-55 mostra uma seção de um teleférico. A maior massa permissível a cada carro com passageiros é 2.800 kg. Os carros, que correm sobre um cabo de sustentação, são puxados por um segundo cabo, preso a um suporte metálico. Qual a diferença na tensão entre seções adjacentes do cabo de tração, se os carros estão com a maior massa permitida e sendo puxados para cima, a 35° de inclinação, com uma aceleração de 0,81 m/s²?

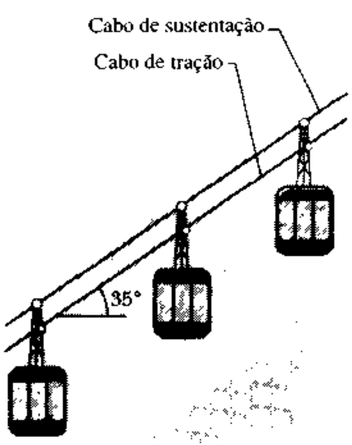


Fig. 5-55 Problema 64.

65P. Uma sonda interestelar tem uma massa de $1{,}20 \times 10^6$ kg, e está inicialmente em repouso em relação a um sistema estelar. (a) Qual a aceleração constante necessária para levar a sonda à velocidade de $0{,}10c$ (onde c é a velocidade da luz), em relação àquele sistema estelar, em 3,0 dias? (Não é necessário considerar a teoria da relatividade de Einstein.) (b) Qual é essa aceleração em unidades g? (c) Que força é necessária para acelerar a sonda? (d) Se os motores forem desligados, quando $0{,}10c$ é alcançada, quanto tempo a sonda leva (do início ao fim) numa jornada de 5,0 meses-luz (a distância que a luz viaja em 5,0 meses)?

66P. Um elevador, como o da Fig. 5-56, é formado por uma cabine (A) de 1.150 kg, um contrapeso (B) de 1.400 kg, um mecanismo de tração (C), um cabo e duas roldanas. Quando em operação, o mecanismo C *segura o cabo, tracionando-o ou parando seu movimento*. Este processo implica que a tensão T_1 no cabo, de um lado de C, difere da tensão T_2 no outro lado. Suponha que as acelerações de subida de A e descida de B tenham módulo $a = 2{,}0$ m/s². Desprezando as roldanas e a massa do cabo, determine (a) T_1, (b) T_2 e (c) a força produzida no cabo por C.

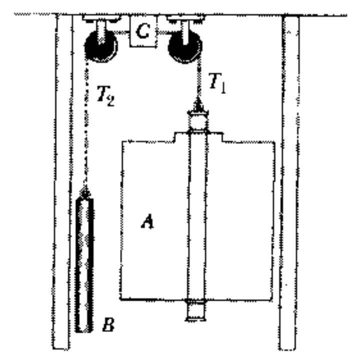


Fig. 5-56 Problema 66.

67P. Um bloco de 5,0 kg é puxado sobre uma superfície horizontal, sem atrito, por uma corda que exerce uma força $F = 12{,}0$ N, fazendo um ângulo $\theta = 25{,}0°$ com a horizontal, conforme a Fig. 5-57. (a) Qual a aceleração do bloco? (b) A força F é lentamente aumentada. Qual é esta força no instante anterior ao levantamento do bloco da superfície? (c) Qual a aceleração nesse mesmo instante?

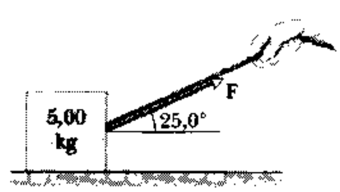


Fig. 5-57 Problema 67.

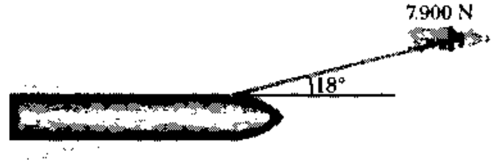


Fig. 5-58 Problema 68.

68P. No passado, cavalos puxavam barcas através de canais, conforme mostrado na Fig. 5-58. Suponha que o cavalo tracione a corda com uma força de 7.900 N, fazendo um ângulo de 18° com a direção do movimento da embarcação, que é paralela ao canal. A massa da mesma é 9.500 kg e sua aceleração é 0,12 m/s². Calcule a força da água sobre a barca.

69P. Uma determinada força causa uma aceleração de 12,0 m/s² na massa m_1, e uma aceleração de 3,30 m/s² na massa m_2. Que aceleração essa força causaria num objeto com massa (a) $m_2 - m_1$ ou (b) $m_2 + m_1$?

70P. Um balão de massa M, com ar quente, está descendo verticalmente com uma aceleração a para baixo (Fig. 5-59). Que quantidade de massa deve ser atirada para fora do balão, para que ele suba com uma aceleração a (mesmo módulo e sentido oposto)? Suponha que a força de subida, devido ao ar, não varie em função da massa (carga de estabilização) que ele perdeu.

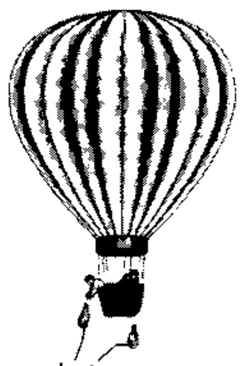


Fig. 5-59 Problema 70.

71P. Um foguete com massa de 3.000 kg é lançado do solo com um ângulo de elevação de 60°. O motor aplica ao foguete uma força de 6,0 × 10⁴ N (empuxo) com um ângulo constante de 60° com a horizontal, por 50 s, e depois desliga. Fazendo uma aproximação grosseira, ignore a massa do combustível consumido e da força de resistência do ar. Calcule (a) a altitude do foguete quando o motor pára e (b) a distância horizontal do ponto de lançamento ao eventual ponto de impacto com o solo (supondo que estão no mesmo nível).

72P. Um bloco de massa M é puxado por uma corda de massa m, sobre uma superfície horizontal, sem atrito, conforme mostrado na Fig. 5-60. A força horizontal **F** é aplicada a uma das extremidades da corda. (a) Mostre que a corda *deve* fletir, mesmo que por uma fração imperceptível. Então, supondo desprezível a flexão, determine (b) a aceleração da corda e do bloco, (c) a força que a corda aplica sobre o bloco e (d) a tensão no ponto médio da corda.

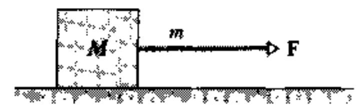


Fig. 5-60 Problema 72.

73P. A Fig. 5-61 mostra um homem sentado numa plataforma de trabalho, pendendo de uma corda de massa desprezível que passa por uma polia, de massa e atrito nulos, e volta até às mãos do homem. A massa conjunta do homem e da plataforma é 95,0 kg. (a) Com que força o homem deve puxar a corda para que ele consiga subir com velocidade constante? (b) Qual a força necessária para subir com a aceleração de 1,30 m/s²? (c) Suponha, ao invés disso, que a corda à direita é segurada por uma pessoa no chão. Repita os itens (a) e (b) para esta nova situação. (d) Qual a força aplicada ao teto pela polia, em cada um dos quatro casos?

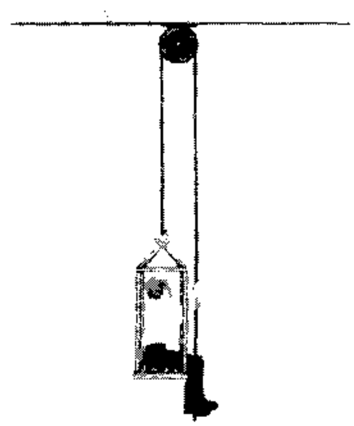


Fig. 5-61 Problema 73.

PROBLEMAS ADICIONAIS

74. Uma motocicleta e um motociclista de 60,0 kg estão subindo uma rampa que faz 10° com a horizontal, com uma aceleração de 3,0 m/s². (a) Qual é o módulo da força resultante sobre o motociclista? (b) Qual o módulo da força exercida pela motocicleta sobre o motociclista?

75. Um bloco pesando 3,0 N repousa numa superfície horizontal. Uma força de 1,0 N, para cima, é aplicada ao bloco por mola fixada verticalmente. Qual o módulo e sentido da força do bloco sobre a superfície horizontal?

76. Determinada massa de 1,0 kg está sobre uma superfície inclinada, sem atrito, e ligada a uma outra massa de 2,0 kg, conforme mostrado na Fig. 5-62. Desconsidere a massa e o atrito da polia. Uma força F = 6,0 N, para cima, é aplicada sobre a massa de 2,0 kg, que tem uma aceleração de 5,5 m/s² para baixo. (a) Qual a tensão na corda de conexão? (b) Qual o ângulo β?

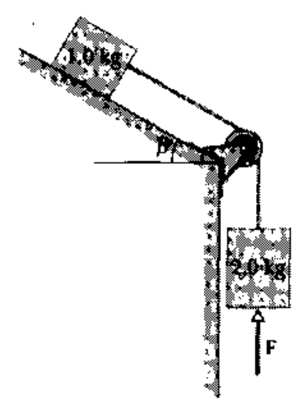


Fig. 5-62 Problema 76.

77. Sobre um objeto de 3,0 kg, que se move com aceleração de 3,0 m/s² no sentido positivo do eixo y, são aplicadas apenas duas forças. Se uma das forças tem módulo de 8,0 N e atua no sentido positivo de x, qual a magnitude da outra?

78. Um módulo espacial decola verticalmente da Lua, onde a aceleração em queda livre é 1,6 m/s². Se o módulo tem uma aceleração para cima de 1,0 m/s², enquanto decola, qual a força do módulo sobre um astronauta que pesa 735 N na Terra?

79. Um disco de hóquei de 0,20 kg tem uma velocidade de 2,0 m/s para leste, deslizando sobre a superfície, sem atrito, de um lago gelado. Qual o módulo e o sentido da força média que devem ser aplicados ao disco, durante um intervalo de 0,50 s, para mudar sua velocidade para (a) 5,0 m/s para oeste e (b) 5,0 m/s para sul?

80. Certa massa de 1,0 kg, sobre um plano inclinado de 37°, está conectada a uma outra de 3,0 kg, sobre uma superfície horizontal (Fig. 5-63). As superfícies e a polia não têm atrito. Se **F** = 12 N, qual a tensão na corda de ligação?

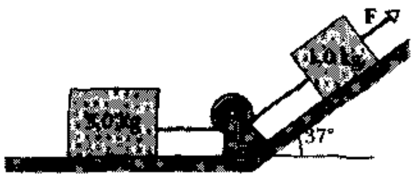


Fig. 5-63 Problema 80.

81. Sobre uma certa massa de 3,0 kg, são aplicadas apenas duas forças. Uma de 9,0 N, aplicada no sentido leste, e a outra de 8,0 N, aplicada a 62° noroeste. Qual o módulo da aceleração da massa?

82. Quando o sistema da Fig. 5-64 é liberado do repouso, a massa de 3,0 kg tem uma aceleração de 1,0 m/s² para a direita. As superfícies e a polia não têm atrito. (a) Qual a tensão na corda de conexão? (b) Qual o valor de M?

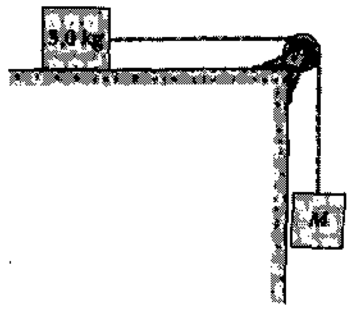


Fig. 5-64 Problema 82.