LEIS DE NEWTON DO MOVIMENTO

4

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

Ao estudar este capítulo, você aprenderá:

- O que significa o conceito de força na física e por que as forças são vetores.
- O significado da força resultante sobre um objeto e o que acontece quando essa força é nula.
- A relação entre a força resultante sobre um objeto, a massa do objeto e sua aceleração.
- Como se relacionam as forças que dois corpos exercem mutuamente.

A criança em pé está empurrando a outra sentada no balanço. A criança sentada está empurrando de volta? Em caso afirmativo, ela está empurrando com força igual ou diferente?

Nos dois capítulos anteriores, vimos como descrever o movimento em uma, duas ou três dimensões. Mas quais são as *causas* subjacentes de um movimento? Por exemplo, como pode um rebocador rebocar um navio muito mais pesado do que ele? Por que é mais difícil controlar um carro que se desloca sobre uma pista de gelo do que quando ele se desloca sobre uma pista de concreto seco? As respostas a essas e outras questões semelhantes nos conduzem ao estudo da **dinâmica**, a relação entre o movimento e as forças que o produzem. Nos dois capítulos anteriores, estudamos a *cinemática*, a linguagem para *descrever* o movimento. Agora estamos aptos a entender o que faz os corpos se moverem da maneira como eles o fazem.

Neste capítulo, usaremos dois conceitos novos, *força* e *massa*, para analisar os princípios da dinâmica. Esses princípios podem ser sintetizados em um conjunto de três afirmações claramente estabelecidas pela primeira vez por sir Isaac Newton (1642-1727), que as publicou em 1687 em sua obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ("Princípios Matemáticos da Filosofia Natural"). Essas três afirmações são conhecidas como as **leis de Newton do movimento**. A primeira afirma que, quando a força resultante que atua sobre um corpo é igual a zero, o movimento do corpo não se altera. A segunda lei de Newton relaciona a força com a aceleração quando a força resultante que atua sobre um corpo *não* é igual a zero. A terceira lei é uma relação entre as forças de interação que um corpo exerce sobre o outro.

As leis de Newton não são o produto de derivações matemáticas, mas, antes, uma síntese do que os físicos têm aprendido a partir de uma série de *experiências* sobre como os objetos se movem. (Newton usou idéias e observações de muitos cientistas que o precederam, tais como: Copérnico, Brahe, Kepler e especialmente Galileu Galilei, que faleceu no mesmo ano do nascimento de Newton.) Essas leis são genuinamente fundamentais, pois não podem ser deduzidas ou demonstradas a partir de outros princípios. As leis de Newton são o fundamento da **mecânica clássica** (também conhecida como **mecânica newtoniana**); aplicando-as podemos compreender os tipos mais familiares de movimento. As leis de Newton necessitam de modificações somente em situações que envolvem velocidades muito elevadas (próximas à velocidade da luz) e dimensões muito pequenas (tal como no interior de um átomo).

As leis de Newton podem ser enunciadas de modo muito simples, embora alguns estudantes tenham dificuldade para entendê-las e utilizá-las. A razão é que, antes de estudar física, durante anos você caminhou, jogou bola, empurrou caixas e fez dezenas de coisas que envolvem movimento. Nesse período você desenvolveu um 'senso comum' relativo a noções sobre o movimento e suas causas. Porém, muitas dessas noções pautadas no 'senso comum' não se sustentam perante uma análise lógica. Grande parte da tarefa deste capítulo — e do restante de nosso estudo da física — consiste em ajudar você a perceber que o 'senso comum' pode ocasionalmente induzir ao erro e a ajustar sua compreensão do mundo da física de modo a torná-la compatível com o que as experiências comprovam.

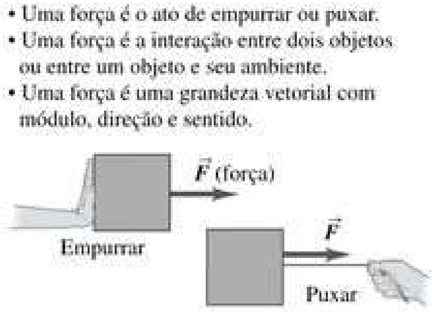


Figura 4.1 Algumas propriedades das forças.

4.1 Força e interações

Na linguagem cotidiana, exercer uma **força** significa puxar ou empurrar. Uma definição melhor é a de que uma força é uma *interação* entre dois corpos ou entre o corpo e seu ambiente (Figura 4.1). Por isso, sempre nos referimos à força que um corpo *exerce* sobre outro. Quando você empurra um carro atolado na neve, você exerce uma força sobre ele; um cabo de aço exerce uma força sobre a viga que ele sustenta em uma construção; e assim por diante. Conforme a Figura 4.1, força é uma grandeza *vetorial*; você pode empurrar ou puxar um corpo em direções diferentes.

Quando uma força envolve o contato direto entre dois corpos, como o ato de puxar ou empurrar um objeto com a mão, ela é chamada de **força de contato**. As figuras 4.2a, 4.2b e 4.2c mostram três tipos comuns de forças de contato. A **força normal** (Figura 4.2a) é exercida sobre um objeto por qualquer superfície com a qual ele tenha contato. O adjetivo *normal* significa que a força sempre age perpendicularmente à superfície de contato, seja qual for o ângulo dessa superfície. Em contraste, a **força de atrito** (Figura 4.2b) exercida sobre um objeto por uma superfície age *paralelamente* à superfície, na direção oposta ao deslizamento. A força de puxar que uma corda esticada exerce sobre um objeto ao qual está amarrada é chamada de **força de tensão** (Figura 4.2c). Um exemplo dessa força é o ato de puxar seu cachorro pela coleira.

Existem também forças denominadas **forças de longo alcance**, que atuam mesmo quando os corpos estão muito afastados entre si. Por exemplo, a força entre um par de ímãs e também a força da gravidade (Figura 4.2d); a Terra exerce uma atração gravitacional sobre um objeto em queda, mesmo que não haja nenhum contato direto entre o objeto e a Terra. A atração gravitacional que a Terra exerce sobre você é o seu **peso**.

Para descrever um vetor força $\vec{F}$, é necessário descrever a *direção* e o *sentido* em que ele age, bem como seu *módulo*, que especifica 'quanto' ou 'a intensidade' com que a força puxa ou empurra. A unidade SI do módulo de uma força é o *newton*, abreviado por N. (Forneceremos uma definição precisa do newton na Seção 4.3.) Na Tabela 4.1 indicamos valores típicos dos módulos de algumas forças.

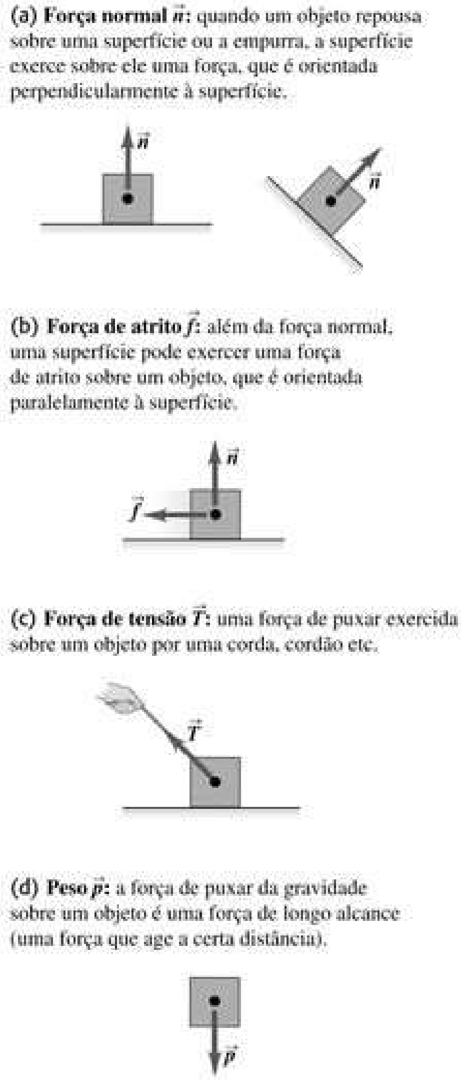


Figura 4.2 Quatro tipos de força.

Um instrumento comum para medir módulos de força é o *dinamômetro*, cujo funcionamento é semelhante ao de uma *balança de molas*. Esse instrumento é constituído por uma mola protegida no interior de uma caixa cilíndrica com um ponteiro ligado em sua extremidade. Quando são aplicadas forças nas extremidades da mola, ela se deforma; o valor da deformação é proporcional à força aplicada. Podemos fazer uma escala para o ponteiro e calibrá-la

Tabela 4.1 Valores típicos dos módulos de algumas forças

Atração gravitacional exercida pelo Sol sobre a Terra	$3{,}5 \times 10^{22}$ N
Força de propulsão de um ônibus espacial durante o lançamento	$3{,}1 \times 10^{7}$ N
Peso de uma baleia azul	$1{,}9 \times 10^{6}$ N
Força de propulsão máxima de uma locomotiva	$8{,}9 \times 10^{5}$ N
Peso aproximado de um homem com massa de 110 kg	$1{,}1 \times 10^{3}$ N
Peso de uma maçã média	1 N
Peso do menor ovo de um inseto	2×10^{-6} N
Atração elétrica entre o próton e o elétron em um átomo de hidrogênio	$8{,}2 \times 10^{-8}$ N
Peso de uma pequena bactéria	1×10^{-18} N
Peso de um átomo de hidrogênio	$1{,}6 \times 10^{-26}$ N
Peso de um elétron	$8{,}9 \times 10^{-30}$ N
Atração gravitacional entre o próton e o elétron em um átomo de hidrogênio	$3{,}6 \times 10^{-47}$ N

usando diversos pesos de 1 N cada. Quando um, dois ou mais desses pesos são suspensos pela balança, a força que deforma a mola será de 1 N, 2 N e assim sucessivamente, e podemos marcar os pontos referentes a 1 N, 2 N e assim sucessivamente. A seguir, poderemos usar esse instrumento para medir o módulo de uma força desconhecida. O instrumento pode ser usado tanto para forças que empurram a mola quanto para forças que a puxam.

A Figura 4.3 mostra um dinamômetro sendo usado para medir uma força que empurra e outra que puxa uma caixa. Em cada caso, desenhamos um vetor para representar a força aplicada. Os vetores indicam o módulo e a direção da força. O comprimento da flecha também indica o módulo do vetor; quanto mais longo o vetor, maior o módulo da força.

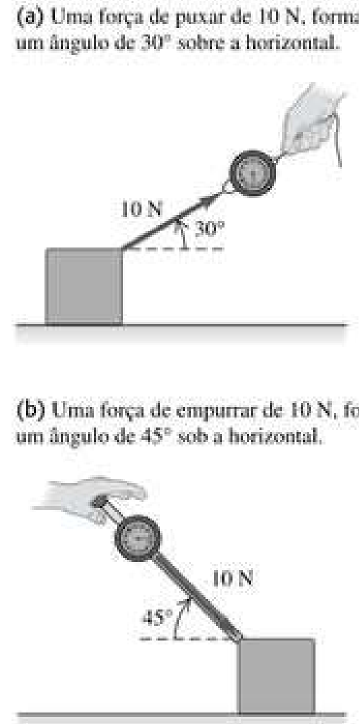


Figura 4.3 Usando uma flecha vetorial para designar a força que exercemos quando (a) puxamos um bloco com um barbante ou (b) empurramos um bloco com uma vara.

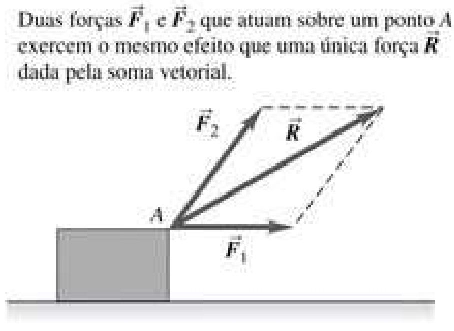


Figura 4.4 Superposição de forças.

Superposição de forças

Quando você joga uma bola, pelo menos duas forças agem sobre ela: o empurrão da sua mão e o puxão para baixo da gravidade. Experiências comprovam que, quando duas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ atuam simultaneamente em um ponto A de um corpo (Figura 4.4), o efeito sobre o movimento do corpo é o mesmo que o efeito produzido por uma única força $\vec{R}$ dada pela *soma vetorial* das duas forças: $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Generalizando, *o efeito sobre o movimento de um corpo produzido por um número qualquer de forças é o mesmo efeito produzido por uma força única igual à soma vetorial de todas as forças.* Esse resultado importante denomina-se princípio da **superposição das forças**.

A descoberta experimental de que as forças se combinam seguindo a regra da soma vetorial é de extraordinária importância. Usaremos esse fato muitas vezes em nossos estudos de física. Isso nos permite substituir uma força pelos seus vetores componentes, como fizemos com os deslocamentos na Seção 1.8. Por exemplo, na Figura 4.5a, a força $\vec{F}$ atua sobre o corpo em um ponto O. Os vetores componentes de $\vec{F}$ nas direções Ox e Oy são $\vec{F}_x$ e $\vec{F}_y$. Quando aplicamos simultaneamente $\vec{F}_x$ e $\vec{F}_y$, como na Figura 4.5b, o efeito é igual ao produzido pela força original $\vec{F}$. Logo, *qualquer força pode ser substituída pelos seus vetores componentes que atuam em um mesmo ponto.*

Geralmente é mais conveniente descrever uma força $\vec{F}$ em termos dos seus componentes x e y, F_x e F_y do que por meio dos seus vetores componentes (lembre-se de que, de acordo com a Seção 1.8, os *vetores componentes* são vetores, enquanto os *componentes* são apenas números). Para o caso indicado na Figura 4.5, F_x e F_y são ambos positivos, mas, dependendo da orientação da força $\vec{F}$, qualquer um dos valores de F_x e de F_y pode ser negativo ou nulo.

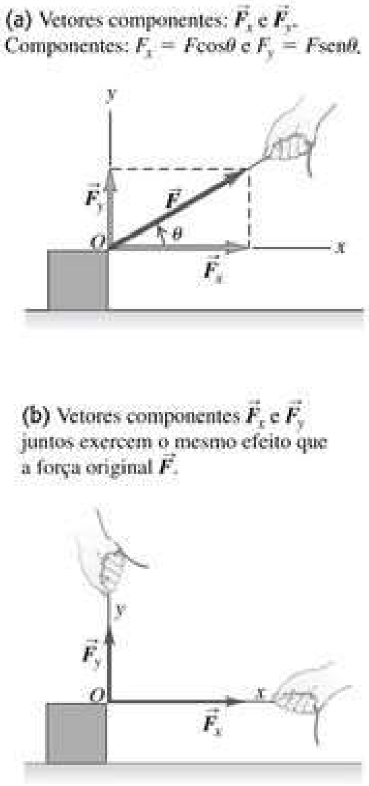


Figura 4.5 A força $\vec{F}$, que atua formando um ângulo θ com o eixo Ox, pode ser substituída pelos seus vetores componentes retangulares $\vec{F}_x$ e $\vec{F}_y$.

Não existe nenhuma lei que nos obrigue a escolher os eixos na direção vertical ou horizontal. A Figura 4.6 mostra um engradado sendo puxado para cima de uma rampa por uma força $\vec{F}$ representada por seus componentes F_x, paralelo ao plano, e F_y, perpendicular ao plano inclinado.

ATENÇÃO Uso de sinal ondulado em diagramas de força Na Figura 4.6 usamos um sinal ondulado sobre o vetor força $\vec{F}$ para indicar que essa força foi substituída pelos seus componentes x e y. Caso contrário, o diagrama estaria incluindo a mesma força duas vezes. Usamos esse sinal ondulado em todo diagrama em que a força é substituída pelos seus componentes.

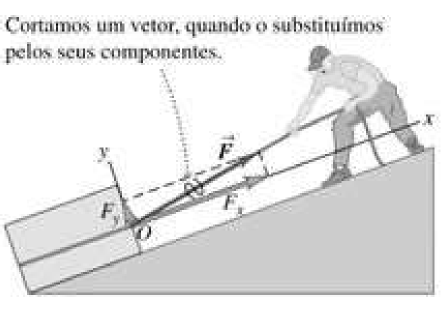


Figura 4.6 F_x e F_y são os componentes de $\vec{F}$ paralelo e perpendicular à superfície da ladeira no plano inclinado.

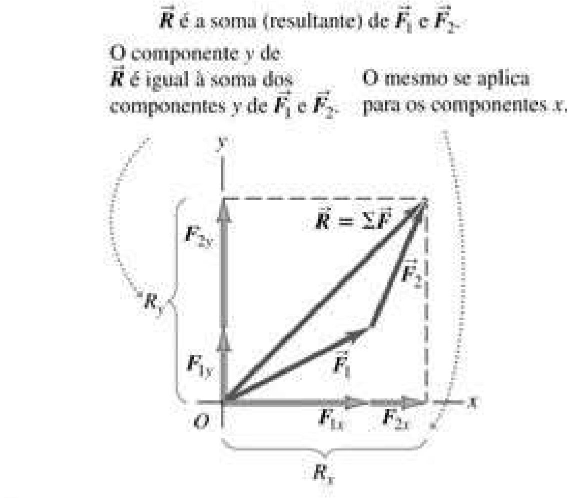


Figura 4.7 Achando os componentes do vetor soma (resultante) $\vec{R}$ de duas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$.

Normalmente precisaremos determinar o vetor soma (resultante) de *todas* as forças que atuam sobre um corpo. Chamaremos essa soma de **força resultante** que atua sobre um corpo. Usaremos a letra grega maiúscula Σ ('sigma' maiúsculo, equivalente à letra S) como uma notação manuscrita para designar uma soma. Se as forças forem designadas por $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, e assim por diante, abreviaremos a soma do seguinte modo

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \cdots = \sum \vec{F} \tag{4.1}$$

onde $\Sigma\vec{F}$ é lido como 'o vetor soma das forças' ou 'vetor força resultante'. A versão da Equação (4.1) para a linguagem dos seus componentes é o par de equações:

$$R_x = \sum F_x \qquad R_y = \sum F_y \tag{4.2}$$

onde ΣF_x é a soma dos componentes x e ΣF_y é a soma dos componentes y (Figura 4.7). Cada componente pode ser positivo ou negativo, portanto tome cuidado com os sinais quando avaliar a soma indicada na Equação (4.2).

Uma vez determinados R_x e R_y, podemos achar o módulo, a direção e o sentido da força resultante $\vec{R} = \Sigma\vec{F}$ que atua sobre um corpo. O módulo é:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

e o ângulo θ entre $\vec{R}$ e o eixo $+Ox$ pode ser determinado pela relação $\text{tg}\theta = R_y/R_x$. Os componentes R_x e R_y podem ser positivos, negativos ou nulos, e o ângulo θ pode estar em qualquer um dos quatro quadrantes.

Para problemas em três dimensões, as forças possuem componentes no eixo Oz, portanto adicionamos a equação $R_z = \Sigma F_z$ à Equação (4.2). O módulo da força resultante será então

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$$

Exemplo 4.1

SUPERPOSIÇÃO DE FORÇAS Três lutadores profissionais estão lutando pelo mesmo cinturão de campeão. Olhando de cima, eles aplicam três forças horizontais sobre o cinturão, conforme indicado na Figura 4.8a. Os módulos das três forças são $F_1 = 250$ N, $F_2 = 50$ N e $F_3 = 120$ N. Ache os componentes x e y da força resultante. Determine o módulo, a direção e o sentido da força resultante.

SOLUÇÃO

IDENTIFICAR: trata-se apenas de um problema de soma vetorial. O único aspecto novo é que os vetores representam forças.

PREPARAR: necessitamos achar os componentes x e y da força resultante $\vec{R}$, por isso usaremos o método dos componentes da soma vetorial expressa pela Equação (4.2). Quando obtivermos os componentes de $\vec{R}$, poderemos encontrar seu módulo, direção e sentido.

EXECUTAR: na Figura 4.8a, os ângulos entre as forças $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ e $\vec{F}_3$ e o eixo $+Ox$ são $\theta_1 = 180° - 53° = 127°$, $\theta_2 = 0°$ e $\theta_3 = 270°$. Os componentes x e y das três forças são

$$F_{1x} = (250\ \text{N})\cos 127° = -150\ \text{N}$$
$$F_{1y} = (250\ \text{N})\,\text{sen}\,127° = 200\ \text{N}$$
$$F_{2x} = (50\ \text{N})\cos 0° = 50\ \text{N}$$
$$F_{2y} = (50\ \text{N})\,\text{sen}\,0° = 0\ \text{N}$$
$$F_{3x} = (120\ \text{N})\cos 270° = 0\ \text{N}$$
$$F_{3y} = (120\ \text{N})\,\text{sen}\,270° = -120\ \text{N}$$

Pela Equação (4.2), a força resultante $\vec{R} = \Sigma\vec{F}$ possui componentes

$$R_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = (-150\ \text{N}) + 50\ \text{N} + 0\ \text{N} = -100\ \text{N}$$
$$R_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = 200\ \text{N} + 0\ \text{N} + (-120\ \text{N}) = 80\ \text{N}$$

O componente x da força resultante é negativo e o componente y da força resultante é positivo, de modo que ela aponta para a esquerda e para o alto da página na Figura 4.8b (ou seja, está no segundo quadrante).

O módulo da força resultante $\vec{R} = \Sigma\vec{F}$ é

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(-100\ \text{N})^2 + (80\ \text{N})^2} = 128\ \text{N}$$

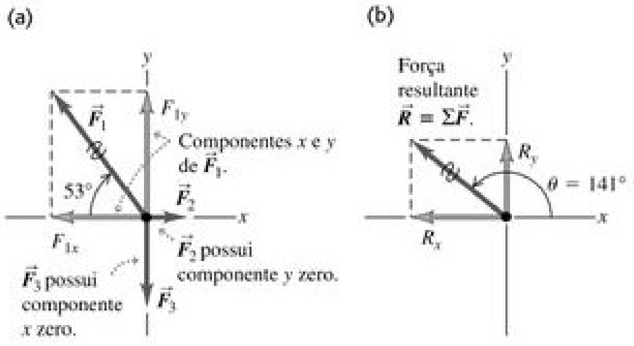


Figura 4.8 (a) Três forças atuando sobre um mesmo ponto. (b) A força resultante $\vec{R} = \Sigma\vec{F}$ e seus componentes.

Para achar o ângulo entre a força resultante e o eixo $+Ox$, utilizamos a relação $\text{tg}\,\theta = R_y/R_x$, ou

$$\theta = \text{arctg}\frac{R_y}{R_x} = \text{arctg}\left(\frac{80\ \text{N}}{-100\ \text{N}}\right) = \text{arctg}(-0{,}80)$$

As duas soluções possíveis são $\theta = -39°$ ou $\theta = -39° + 180° = 141°$. Uma vez que a força resultante está no segundo quadrante, como mencionado antes, a resposta correta é $\theta = 141°$ (Figura 4.8b).

AVALIAR: nessa situação, a força resultante *não* é zero, e você pode deduzir que o lutador 1 (que exerce a maior força, $\vec{F}_1$, sobre o cinturão) provavelmente será o campeão ao final da luta. Na Seção 4.2, exploraremos em detalhes o que acontece em situações nas quais a força resultante *é* zero.

Teste sua compreensão da Seção 4.1 A Figura 4.6 mostra uma força $\vec{F}$ atuando sobre um engradado. Com os eixos x e y mostrados na figura, qual afirmação sobre os componentes da força *gravitacional* que a Terra exerce sobre o engradado (o peso do engradado) está *correta*? i) Os componentes x e y são ambos positivos; ii) O componente x é zero e o componente y é positivo; iii) O componente x é negativo e o componente y é positivo; iv) Os componentes x e y são ambos negativos; v) O componente x é zero e o componente y é negativo; vi) O componente x é positivo e o componente y é negativo. ❚

4.2 Primeira lei de Newton

Discutimos algumas propriedades das forças, mas até agora não mencionamos sobre como as forças afetam o movimento. Para começar, vamos verificar o que ocorre quando a força resultante sobre um corpo é igual a *zero*. Quando um corpo está em repouso, e se nenhuma força resultante atua sobre ele (isto é, nenhuma força puxa ou empurra o corpo), você certamente concorda que esse corpo deve permanecer em repouso. Porém, o que ocorre quando o corpo está em *movimento* e a força resultante sobre ele é igual a zero?

Para ver o que ocorre nesse caso, suponha que você jogue um disco de hóquei sobre o topo de uma mesa horizontal aplicando sobre ele uma força horizontal com sua mão (Figura 4.9a). Depois que você parou de empurrar, o disco *não* continua a se mover indefinidamente; ele diminui de velocidade e pára. Para que seu movimento continuasse, você teria que continuar a empurrar (ou seja, aplicar uma força). O 'senso comum' levaria você a concluir que corpos em movimento devem parar naturalmente e que seria necessário aplicar uma força para sustentar o movimento.

Imagine agora que você empurre o disco de hóquei sobre uma superfície plana de gelo (Figura 4.9b). Depois que você parar de empurrar, o disco percorrerá uma distância maior antes de parar. Coloque-o em uma mesa com um colchão de ar, de modo que ele flutue dentro de uma camada de ar; nesse caso ele percorre uma distância muito maior (Figura 4.9c). Em cada caso, o *atrito*, uma força de

(a) Mesa: o disco desliza pouco.

(b) Gelo: o disco desliza um pouco mais.

(c) Colchão de ar: o disco desliza ainda mais.

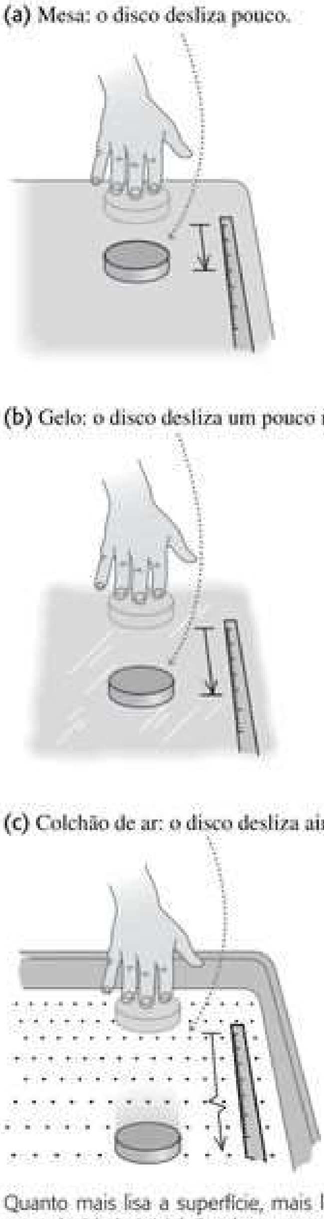


Figura 4.9 Quanto mais lisa a superfície, mais longe um disco desliza após tomar uma velocidade inicial. Se ele se move em um colchão de ar sobre a mesa (c), a força de atrito é praticamente zero, de modo que o disco continua a deslizar com velocidade quase constante.

interação entre a superfície do disco e a superfície sobre a qual ele desliza, é responsável pela diminuição da velocidade do disco; a diferença entre os três casos é o módulo da força de atrito. O gelo exerce uma força de atrito menor do que a força de atrito da superfície do topo da mesa, de modo que o disco percorre uma distância maior antes de parar. As moléculas de ar exercem a menor força de atrito entre as três. Caso fosse possível eliminar completamente o atrito, a velocidade do disco não diminuiria nunca e não precisaríamos de nenhuma força para mantê-lo em movimento. Portanto, o 'senso comum' de que seria necessário aplicar uma força para sustentar o movimento é *incorreto.*

Experiências como as que acabamos de descrever mostram que quando a força resultante é igual a zero o corpo ou está em repouso ou se move em linha reta com velocidade constante. Uma vez iniciado o movimento, não seria necessária nenhuma força resultante para mantê-lo. Este é o enunciado da *primeira lei de Newton:*

Primeira lei de Newton: Quando a força resultante sobre um corpo é igual a zero, ele se move com velocidade constante (que pode ser nula) e aceleração nula.

A tendência de um corpo em permanecer deslocando-se, uma vez iniciado o movimento, resulta de uma propriedade denominada **inércia**. Você usa essa propriedade quando tenta se servir de *ketchup* sacudindo sua embalagem. Inicialmente, quando você movimenta a embalagem para baixo (com o *ketchup* dentro), o conteúdo tende a se mover para baixo; quando você inverte o movimento, o *ketchup* continua a mover-se para a frente e vai terminar no seu hambúrguer. A tendência de um corpo parado manter-se em repouso é também decorrente da inércia. Você já deve ter visto uma experiência na qual a louça distribuída sobre uma toalha de mesa não cai após a toalha ser puxada repentinamente. A força de atrito sobre a porcelana durante o intervalo de tempo muito curto não é suficiente para que ela se mova, logo ela permanece praticamente em repouso.

É relevante notar que na primeira lei de Newton o que importa é conhecer a força *resultante*. Por exemplo, um livro de física em repouso sobre uma mesa horizontal possui duas forças atuando sobre ele: uma força de cima para baixo, oriunda da atração gravitacional que a Terra exerce sobre ele (uma força de longo alcance que atua sempre, independentemente da altura da mesa; Figura 4.2d) e uma força de baixo para cima, oriunda da reação de apoio da mesa (uma força normal; Figura 4.2a). A reação de apoio da mesa de baixo para cima é igual à força da gravidade de cima para baixo, de modo que a força *resultante* que atua sobre o livro (ou seja, a soma vetorial das duas forças) é igual a zero. De acordo com a primeira lei de Newton, se o livro está em repouso sobre a mesa, ele deve permanecer em repouso. O mesmo princípio pode ser aplicado a um disco de hóquei se deslocando sobre uma superfície horizontal sem atrito: a soma vetorial da reação de apoio da superfície de baixo para cima e da força da gravidade de cima para baixo é igual a zero. Uma vez iniciado o movimento do disco, ele deve continuar com velocidade constante porque a força *resultante* atuando sobre ele é igual a zero.

Vejamos outro exemplo. Suponha que um disco de hóquei esteja em repouso sobre uma superfície horizontal com atrito desprezível, tal como um colchão de ar sobre uma mesa ou um bloco de gelo. Se o disco estiver inicialmente em repouso e uma única força horizontal $\vec{F}_1$ atuar sobre ele (Figura 4.10a), o disco começa a se mover. Caso o disco já estivesse se movendo antes da aplicação da força, esta produziria uma variação do módulo ou da direção da velocidade escalar, ou de ambas as grandezas, dependendo da direção da força aplicada. Nesse exemplo, a força resultante é igual a $\vec{F}_1$, que *não* é igual a zero. (Existem também duas forças verticais: a reação de apoio da superfície, de baixo para cima, e a força da gravidade, de cima para baixo. Porém, como dissemos antes, essas forças se anulam.)

Suponha agora que seja aplicada uma segunda força $\vec{F}_2$ (Figura 4.10b), igual em módulo e contrária em direção à força $\vec{F}_1$. As duas forças são antiparalelas e de mesmo módulo, ou seja, $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$, portanto, a soma vetorial é igual a zero:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_1 + (-\vec{F}_1) = \mathbf{0}$$

Novamente, verificamos que se um corpo está parado, ele deve manter-se em repouso; se inicialmente ele já estava em movimento, deve continuar em movimento com velocidade constante. Esses resultados mostram que, na primeira lei de Newton, *força resultante igual a zero é equivalente a nenhuma força.* Isso decorre apenas do princípio da superposição de forças estudado na Seção 4.1.

Quando não existe nenhuma força atuando sobre um corpo ou quando existem diversas forças com uma soma vetorial (resultante) igual a zero, dizemos que o corpo está em **equilíbrio**. No equilíbrio, ou o corpo está em repouso ou está em movimento com velocidade constante. Para um corpo em equilíbrio, a força resultante é igual a zero:

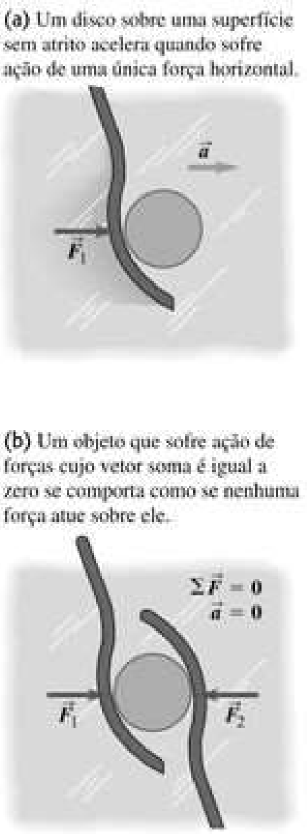


Figura 4.10 (a) Um disco de hóquei acelera no sentido de uma força resultante aplicada $\vec{F}_1$. (b) Quando a força resultante é igual a zero, a aceleração é nula e o disco está em equilíbrio.

$$\sum \vec{F} = \mathbf{0} \qquad (4.3)$$
(corpo em equilíbrio)

Para isso ser verdade, cada um dos componentes da força resultante deve ser igual a zero, logo:

$$\sum F_x = 0 \qquad \sum F_y = 0 \qquad (4.4)$$
(corpo em equilíbrio)

Estamos supondo que o corpo possa ser representado adequadamente por uma partícula pontual. Quando o corpo possui um tamanho finito, também devemos considerar *onde* as forças estão aplicadas sobre o corpo. Voltaremos a esse ponto no Capítulo 11.

Exemplo conceitual 4.2

FORÇA RESULTANTE NULA SIGNIFICA VELOCIDADE CONSTANTE Em um filme de ficção científica da década de 1950, uma espaçonave se move no vácuo do espaço sideral, longe de qualquer planeta, quando seu motor pára de funcionar. Em virtude disso, a espaçonave diminui de velocidade e fica em repouso. Como você aplica a primeira lei de Newton nesse evento?

SOLUÇÃO

Não existe nenhuma força atuando sobre a espaçonave, portanto, pela primeira lei de Newton, ela *não* deve parar. Ela deve continuar a se mover em linha reta com velocidade escalar constante. Alguns filmes de ficção fizeram um uso muito preciso da ciência; este não foi um deles.

Exemplo conceitual 4.3

VELOCIDADE CONSTANTE SIGNIFICA FORÇA RESULTANTE NULA Você está dirigindo um Porsche ao longo de um trecho retilíneo de teste com velocidade escalar constante igual a 150 km/h. Você ultrapassa um Volkswagen que se move com velocidade escalar constante igual a 75 km/h. Para qual dos dois carros a força resultante é maior?

SOLUÇÃO

A palavra fundamental nesta questão é 'resultante'. Os dois carros estão em equilíbrio porque se movem com velocidade constante; logo, a força *resultante* sobre cada carro é igual a *zero*.

Essa conclusão parece contradizer o 'senso comum' segundo o qual o carro mais rápido deve possuir uma força motriz maior. É verdade que a força motriz do Porsche é maior do que a do Volkswagen (graças à elevada potência do Porsche). Porém, existe também uma força *para trás*, exercida sobre cada carro em virtude do atrito com o solo e da resistência do ar. O motor de cada carro produz uma força motriz para a frente, que contrabalanceia a resistência para trás, e cada carro se move com velocidade constante. A força para trás sobre o Porsche é maior por causa de sua maior velocidade, por isso o seu motor deve ser mais potente do que o do Volkswagen.

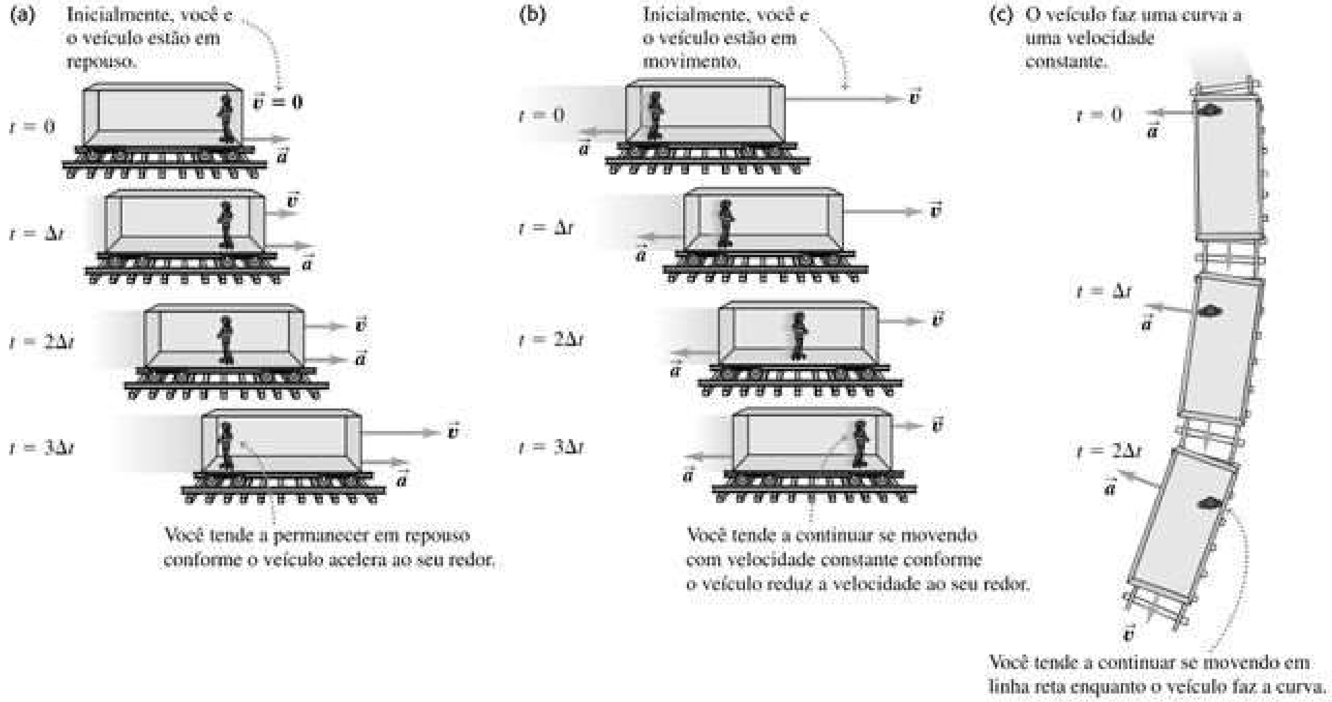


Figura 4.11 Viajando em um veículo acelerando.

Sistema de referência inercial

Ao discutirmos velocidade relativa na Seção 3.5, introduzimos o conceito de *sistema de referência*. Esse conceito é essencial para as leis de Newton do movimento. Suponha que você esteja em um ônibus que acelera ao longo de uma estrada retilínea. Se você pudesse ficar em pé apoiado em patins ao longo do eixo no interior do ônibus, você se deslocaria *para trás* em relação ao ônibus à medida que o motorista acelerasse o veículo. Ao contrário, se o ônibus freasse para parar, você começaria a se mover para a frente. Tudo se passa como se a primeira lei de Newton não estivesse sendo obedecida; aparentemente não existe nenhuma força resultante atuando sobre você, embora sua velocidade esteja variando. O que existe de errado?

O fato é que o ônibus está sendo acelerado em relação à Terra e este *não* é um sistema de referência adequado para a aplicação da primeira lei de Newton. Essa lei vale para alguns sistemas de referência e não vale para outros. Um sistema de referência para o qual a primeira lei de Newton é válida denomina-se **sistema de referência inercial**. A Terra pode ser considerada aproximadamente um sistema de referência inercial, mas não o ônibus nesse caso. (A Terra não é exatamente um sistema de referência inercial porque possui uma aceleração devida à sua rotação e por causa de seu movimento em torno do Sol. Contudo, esses efeitos são muito pequenos; veja os exercícios 3.29 e 3.32.) Como a primeira lei de Newton é usada para definir um sistema de referência inercial, algumas vezes ela é chamada *lei da inércia*.

A Figura 4.11 mostra como usar a primeira lei de Newton para compreender o que ocorre quando você viaja em um veículo em aceleração. Na Figura 4.11a, o veículo está inicialmente em repouso e a seguir começa a acelerar para a direita. Uma passageira sobre patins (cujas rodas praticamente eliminam os efeitos do atrito) não sofre quase nenhuma força resultante sobre si e por isso tende a permanecer em repouso em relação ao sistema de referência inercial da Terra. À medida que o veículo acelera para a frente, ela se move para trás em relação ao veículo. Analogamente, um passageiro em um veículo que reduz a velocidade tende a continuar se movendo com velocidade constante em relação à Terra e, portanto, move-se para a frente em relação ao veículo (Figura 4.11b). Um veículo também está acelerando quando se move a uma velocidade constante, mas faz uma curva (Figura 4.11c). Nesse caso, um passageiro tende a continuar se movendo em relação à Terra com uma velocidade constante em linha reta; em relação ao veículo, o passageiro se move lateralmente para fora da curva.

Em cada caso mostrado na Figura 4.11, um observador fixo no sistema de referência do veículo pode ser levado a concluir que *há* uma força resultante atuando sobre o passageiro, já que a velocidade dele *relativa ao veículo* varia conforme o caso. Essa conclusão está errada; a força resultante sobre o passageiro é, na verdade, igual a zero. O erro do observador do veículo está em tentar aplicar a primeira lei de Newton no sistema de referência do veículo, que *não* é um sistema de referência inercial e no qual não se aplica a primeira lei de Newton (Figura 4.12). Neste livro, usaremos *somente* sistema de referência inercial.

Mencionamos apenas um sistema de referência (aproximadamente) inercial: a superfície terrestre. Mas há muitos desses sistemas. Quando temos um sistema de referência inercial A, que obedece à primeira lei de Newton, então *qualquer* segundo sistema de referência B também será inercial, se ele se move em relação à A com velocidade constante $\vec{v}_{B/A}$. Podemos provar isso usando a relação da velocidade relativa da Equação (3.36), na Seção 3.5:

$$\vec{v}_{P/A} = \vec{v}_{P/B} + \vec{v}_{B/A}$$

Suponha que P seja um corpo que se move com velocidade constante $\vec{v}_{P/A}$ em relação a um sistema de referência inercial A. Pela primeira lei de Newton, a força resultante sobre esse corpo é igual a zero. A velocidade de P relativa a outro sistema de referência B possui um valor diferente, $\vec{v}_{P/B} = \vec{v}_{P/A} - \vec{v}_{B/A}$. Mas, se a velocidade relativa $\vec{v}_{B/A}$ dos dois sistemas for constante, então $\vec{v}_{P/B}$ também é constante. Logo, B também é um sistema de referência inercial; a velocidade de P nesse sistema de referência é constante e a força resultante sobre P é igual a zero, portanto, a primeira lei de Newton é seguida em B. Observadores nos sistemas A e B discordarão sobre a velocidade de P, mas concordarão que P possui velocidade constante (aceleração zero) e força resultante nula atuando sobre ele.

Na formulação das leis de Newton, não há nenhum sistema de referência inercial privilegiado. Se um sistema de referência é inercial, então qualquer outro sistema que se mova em relação a ele com velocidade constante também é inercial. Sob esse ponto de vista, o estado de repouso e o estado de movimento com velocidade constante não são muito diferentes; ambos ocorrem quando o vetor soma das forças que atuam sobre o corpo é igual a zero.

Figura 4.12 A partir do sistema de referência do carro, parece que uma força empurra os bonecos de teste de colisão para a frente, quando o carro freia repentinamente. Conforme o carro pára, os bonecos continuam a se mover para a frente como conseqüência da primeira lei de Newton.

Teste sua compreensão da Seção 4.2 Em qual das seguintes situações a força resultante que atua sobre um corpo é igual a zero? i) Um vôo de avião que se desloca para o norte, com altura e velocidade constantes a 120 m/s; ii) Um carro subindo uma colina, com 3° de inclinação e velocidade constante 90 km/h; iii) Uma águia voando em círculo a constantes 20 km/h e 15 m de altura sobre um campo aberto; iv) Uma caixa com superfícies lisas, sem atrito, transportada por um caminhão que acelera em uma estrada plana a 5 m/s^2. ∎

4.3 Segunda lei de Newton

Segundo a primeira lei de Newton, quando um corpo sofre uma força resultante nula, ele se move com velocidade constante e aceleração zero. Na Figura 4.13a, um disco de hóquei desliza da esquerda para a direita sobre uma superfície de gelo. O atrito é desprezível, portanto não há forças horizontais atuando sobre o disco; a força da gravidade, que atua de cima para baixo, e a força normal exercida pela superfície de gelo, que atua de baixo para cima, somam zero. Logo, a força resultante $\sum\vec{F}$ que atua sobre o disco é nula, o disco possui aceleração zero e sua velocidade é constante.

Mas o que acontece quando a força resultante é *diferente* de zero? Sobre um disco em movimento, na Figura 4.13b, aplicamos uma força horizontal constante na mesma direção e sentido em que ele se move. Logo, $\sum\vec{F}$ é constante e se desloca na mesma direção horizontal de $\vec{v}$. Descobrimos que enquanto a força está atuando, a velocidade do disco varia a uma taxa constante; ou seja, o disco se move com aceleração constante. A velocidade escalar do disco aumenta, de modo que a aceleração $\vec{a}$ está na mesma direção de $\vec{v}$ e $\sum\vec{F}$.

Na Figura 4.13c, invertemos o sentido da força sobre o disco, de modo que $\sum\vec{F}$ atue em oposição a $\vec{v}$. Também nesse caso, o disco possui uma aceleração; o disco se move cada vez mais lentamente para a direita. A aceleração $\vec{a}$ neste caso é para a esquerda, na mesma direção de $\sum\vec{F}$. Como no caso anterior, a experiência prova que a aceleração será constante, se $\sum\vec{F}$ for constante.

Concluímos que *uma força resultante que atua sobre um corpo faz com que o corpo acelere na mesma direção que a força resultante.* Se o módulo da força resultante for constante, como nas figuras 4.13b e 4.13c, assim será o módulo de aceleração.

Essas conclusões sobre força resultante e aceleração também se aplicam a um corpo que se move ao longo de uma trajetória curva. Por exemplo, a Figura 4.14 mostra um disco de hóquei que se desloca em um círculo horizontal sobre uma superfície de gelo, com atrito desprezível. Uma corda que prende o disco à superfície de gelo exerce uma força de tensão de módulo constante orientado para o interior do círculo. O resultado é uma força resultante e

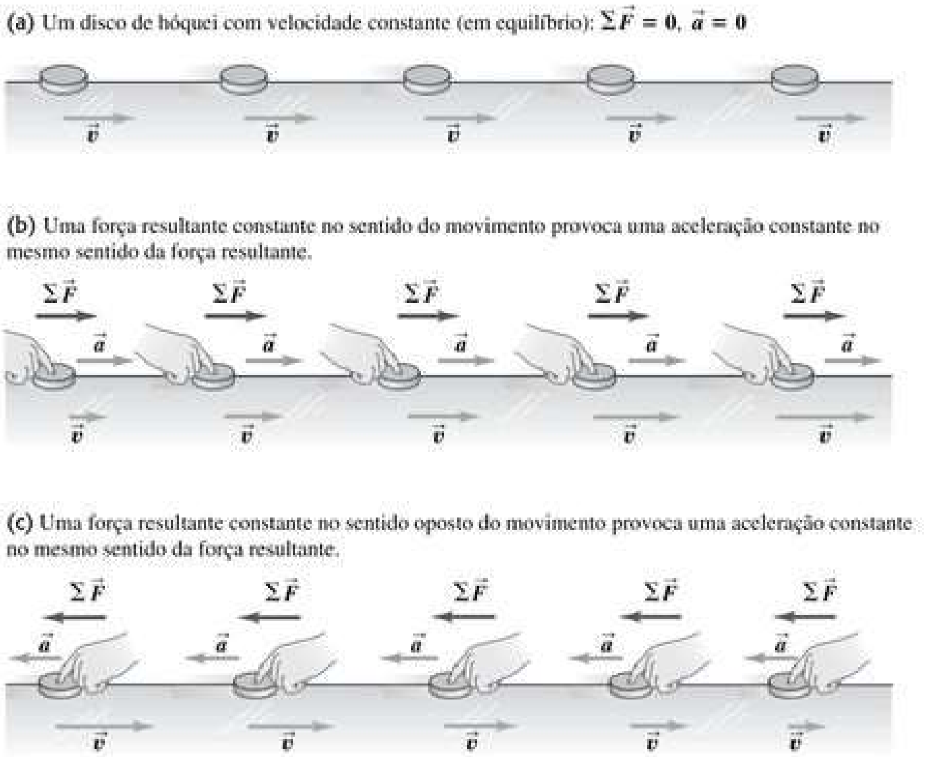


Figura 4.13 Vamos explorar a relação entre a aceleração de um corpo e a força resultante que atua sobre ele (neste caso, um disco de hóquei sobre uma superfície sem atrito).

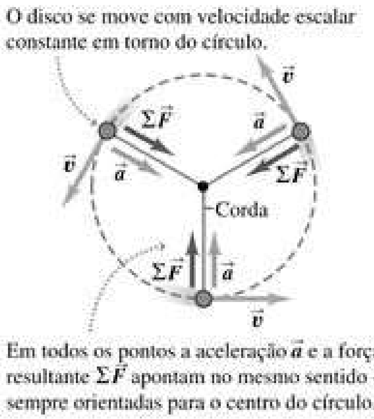


Figura 4.14 Visão aérea de um disco de hóquei em movimento circular uniforme sobre uma superfície horizontal sem atrito.

uma aceleração que são constantes em módulo e direcionadas para o centro do círculo. A velocidade escalar do disco é constante, logo identificamos um movimento circular uniforme, como foi discutido na Seção 3.4.

A Figura 4.15a mostra outra experiência para explorar a relação entre a aceleração e a força resultante que atua sobre um corpo. Aplicamos uma força horizontal constante sobre um disco de hóquei em uma superfície horizontal sem atrito, usando o dinamômetro descrito na Seção 4.1 com a mola esticada a um valor constante. Tanto na Figura 4.13b quanto na Figura 4.13c, essa força horizontal é igual à força resultante que atua sobre o disco. Fazendo variar o módulo da força resultante, a aceleração varia com a mesma proporção. Dobrando-se a força resultante, a aceleração dobra (Figura 4.15b); usando-se metade da força resultante, a aceleração se reduz à metade (Figura 4.15c) e assim por diante. Diversas experiências

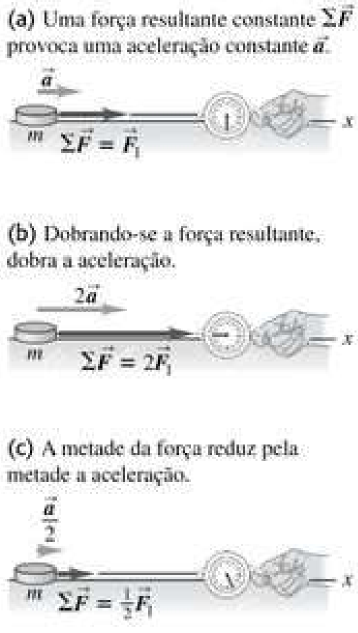


Figura 4.15 Para um corpo de uma dada massa m, o módulo da aceleração do corpo é diretamente proporcional ao módulo da força resultante que atua sobre o corpo.

análogas mostram que, *para qualquer dado objeto, o módulo da aceleração é diretamente proporcional ao módulo da força resultante que atua sobre o corpo.*

Massa e força

Nossos resultados significam que, para um dado corpo, a *razão* entre o módulo da força resultante $|\sum\vec{F}|$ e o módulo da aceleração $a = |\vec{a}|$ é constante, independentemente do módulo da força resultante. Essa razão denomina-se *massa inercial* do corpo, ou simplesmente **massa**, e será representada por m. Ou seja:

$$m = \frac{|\sum\vec{F}|}{a} \quad \text{ou} \quad |\sum\vec{F}| = ma \quad \text{ou} \quad a = \frac{|\sum\vec{F}|}{m} \tag{4.5}$$

A massa mede quantitativamente a inércia, já discutida na Seção 4.2. Conforme a última das equações na Equação (4.5), quanto maior a massa, mais um corpo 'resiste' a ser acelerado. Quando você segura uma fruta e a joga levemente para cima e para baixo para estimar seu peso, você está aplicando uma força e observando quanto a fruta acelera, para cima e para baixo em resposta. Se uma força produz uma aceleração grande, a massa da fruta é pequena; se a mesma força produz uma aceleração pequena, a massa da fruta é grande. Similarmente, se você aplicar a mesma força em uma bola de tênis de mesa e depois em uma bola de basquete, vai notar que a bola de basquete possui uma aceleração menor porque sua massa é muito maior.

A unidade SI de massa é o **quilograma.** Mencionamos na Seção 1.3 que o quilograma é oficialmente definido como a massa de um padrão de uma liga de irídio-platina mantido em uma repartição de pesos e medidas próxima de Paris. Podemos usar esse quilograma padrão, juntamente com a Equação (4.5), para definir o **newton**:

Um newton é o valor de uma força que imprime a um corpo de um quilograma de massa uma aceleração de um metro por segundo ao quadrado.

Podemos usar essa definição para calibrar um dinamômetro e outros instrumentos destinados a medir forças. Por causa da maneira como definimos o newton, ele é relacionado com as unidades de comprimento, massa e tempo. Para que a Equação (4.5) seja dimensionalmente coerente, a seguinte relação precisa ser verdadeira

1 newton = (1 quilograma) (1 metro por segundo ao quadrado)

ou

$$1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Usaremos esta relação muitas vezes nos próximos capítulos, portanto ela deve ser sempre lembrada.

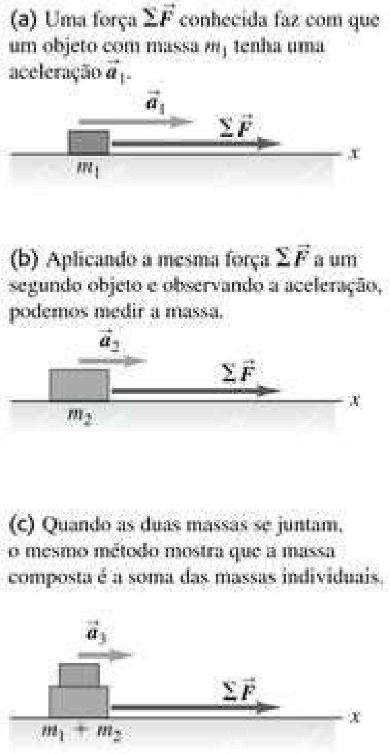


Figura 4.16 Para uma força resultante $\sum\vec{F}$ atuando sobre um corpo, a aceleração é inversamente proporcional à massa do corpo. As massas se somam como escalares comuns.

Podemos também usar a Equação (4.5) para comparar massas com a massa padrão e, portanto, *medir* massas. Suponha que aplicamos uma força resultante $\sum\vec{F}$ sobre um corpo de massa conhecida m_1 e achamos uma aceleração de módulo a_1 (Figura 4.16a). Podemos a seguir aplicar a mesma força a um outro corpo de massa m_2 e achar uma aceleração de módulo a_2 (Figura 4.16b). Então, de acordo com a Equação (4.5),

$$m_1 a_1 = m_2 a_2$$

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2} \qquad \text{(mesma força resultante)} \tag{4.6}$$

Para a mesma força resultante, a razão entre as massas é o inverso da razão entre as acelerações. Em princípio, poderíamos usar a Equação (4.6) para medir uma massa desconhecida m_2, porém, normalmente é mais prático determinar a massa indiretamente pela medida do *peso* do corpo. Voltaremos a esse ponto na Seção 4.4.

Quando duas massas m_1 e m_2 se juntam, verificamos que elas formam um corpo composto de massa $m_1 + m_2$ (Figura 4.16c). Essa propriedade aditiva das massas parece óbvia, porém, ela deve ser verificada experimentalmente. Efetivamente, a massa de um corpo depende do número de prótons, nêutrons e elétrons que ele contém. Essa não seria uma boa *definição* de massa, visto que não existe nenhum método prático para se contar o número dessas partículas. Contudo, o conceito de massa fornece a maneira mais fundamental para se caracterizar a quantidade de matéria contida em um corpo.

Segunda lei de Newton

Afirmamos cuidadosamente que a *força resultante* que atua sobre um corpo é a responsável pela aceleração do corpo. A experiência mostra que quando diversas forças $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$ e assim por diante são aplicadas sobre um corpo, ele terá a mesma aceleração (módulo, direção e sentido) que teria se sobre ele atuasse uma única força dada pela soma vetorial $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots$. Em outras palavras, o princípio da superposição das forças também vale quando a força resultante que atua sobre o corpo não é zero e o corpo possui uma aceleração.

A Equação (4.5) relaciona o módulo da força resultante que atua sobre o corpo com o módulo da aceleração que ela produz. Também vimos que a força resultante possui a mesma direção e o mesmo sentido da aceleração, tanto no caso de uma trajetória retilínea quanto no caso de uma trajetória curvilínea. Newton sintetizou todas essas relações e resultados experimentais em uma única formulação denominada *segunda lei de Newton:*

Segunda lei de Newton: quando uma força resultante externa atua sobre um corpo, ele se acelera. A aceleração possui a mesma direção e o mesmo sentido da força resultante. O vetor força resultante é igual ao produto da massa do corpo pelo vetor aceleração do corpo.

Em símbolos,

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \qquad (4.7)$$

(segunda lei de Newton)

Uma formulação alternativa é que a aceleração de um corpo possui a mesma direção e o mesmo sentido da força resultante que atua sobre ele e é igual à força resultante dividida pela sua massa:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}$$

A segunda lei de Newton é uma lei fundamental da natureza, a relação básica entre força e movimento. No restante deste capítulo e em todo o capítulo seguinte vamos nos dedicar a estudar como aplicar esta lei em diversas circunstâncias.

A Equação (4.7) possui muitas aplicações práticas (Figura 4.17). Na realidade você já a utilizou diversas vezes para medir a aceleração do seu corpo. Na parte interna do seu ouvido, células ciliares microscópicas sentem o módulo, a direção e o sentido da força que elas devem exercer para que pequenas membranas se desloquem com a mesma aceleração do corpo inteiro. Pela segunda lei de Newton, a aceleração das membranas — e, portanto, do seu corpo inteiro — é proporcional a essa força e possui a mesma direção e o mesmo sentido. Desse modo, você pode sentir o módulo, a direção e o sentido da sua aceleração mesmo com os olhos fechados!

Figura 4.17 O projeto de uma motocicleta de alto desempenho depende fundamentalmente da segunda lei de Newton. Para maximizar a aceleração, o projetista deve fazer a motocicleta ser o mais leve possível (isto é, minimizar sua massa) e usar o motor mais potente possível (isto é, maximizar a força motriz).

Aplicações da segunda lei de Newton

Existem pelo menos quatro aspectos da segunda lei de Newton que necessitam de atenção especial. Primeiro, a Equação (4.7) é uma equação *vetorial*. Normalmente ela será usada mediante a forma dos componentes, escrevendo-se separadamente uma equação para cada componente da força e a aceleração correspondente:

$$\sum F_x = ma_x \qquad \sum F_y = ma_y \qquad \sum F_z = ma_z \qquad (4.8)$$

(segunda lei de Newton)

Esse conjunto de equações para cada componente é equivalente à Equação (4.7). Cada componente da força resultante é igual à massa vezes o componente correspondente da aceleração.

Segundo, a segunda lei de Newton refere-se a forças *externas*. Com isso queremos dizer que essas forças são exercidas por outros corpos existentes em suas vizinhanças. É impossível um corpo afetar seu próprio movimento exercendo uma força sobre si mesmo; se isso fosse possível, você poderia dar um pulo até o teto puxando seu cinto de baixo para cima! É por isso que somente forças externas são incluídas em todas as somas das forças indicadas nas equações (4.7) e (4.8).

Terceiro, as equações (4.7) e (4.8) são válidas apenas quando a massa m é *constante*. É fácil imaginar sistemas que possuem massas variáveis, como um caminhão-tanque vazando líquido, um foguete se deslocando ou um vagão em movimento em uma estrada de ferro sendo carregado com carvão. Porém, tais sistemas são mais bem estudados mediante o conceito de momento linear; esse assunto será abordado no Capítulo 8.

Finalmente, a segunda lei de Newton é válida somente em sistemas de referência inerciais, como no caso da primeira lei de Newton. Portanto, ela não vale para nenhum dos veículos acelerados indicados na Figura 4.11; em relação a qualquer um desses sistemas, o passageiro acelera, embora a força resultante seja igual a zero. Geralmente supomos que a Terra seja aproximadamente um sistema de referência inercial, entretanto, devido ao movimento de rotação e ao movimento orbital, este sistema não é exatamente inercial.

ATENÇÃO $m\vec{a}$ **não é uma força** Observe que, embora a grandeza $m\vec{a}$ seja igual ao vetor soma $\sum\vec{F}$ de todas as forças atuando sobre o copo, o vetor $m\vec{a}$ *não* é uma força. A aceleração é o *resultado* de uma força resultante diferente de zero; não é um força propriamente dita. De acordo com o 'senso comum', existe uma 'força de aceleração' que empurra você contra o assento do carro quando você acelera bruscamente o carro a partir do repouso. Porém, *tal força não existe*; em vez disso, a sua inércia determina que você fique em repouso em relação à Terra e o carro acelere para a frente (Figura 4.11a). A confusão provocada pelo 'senso comum' é que se tenta aplicar a segunda lei de Newton a um sistema de referência onde ela não vale, como o sistema de referência não inercial de um carro com aceleração. Vamos sempre estudar somente movimentos em relação a um sistema de referência *inercial*.

Para aprender a usar a segunda lei de Newton, vamos começar neste capítulo com exemplos de movimento retilíneo. No Capítulo 5 examinaremos casos mais gerais e desenvolveremos estratégias para a solução de problemas mais detalhados aplicando a segunda lei de Newton.

Exemplo 4.4

DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO A PARTIR DA FORÇA
Um trabalhador aplica uma força horizontal constante de módulo igual a 20 N sobre uma caixa de massa igual a 40 kg que está em repouso sobre uma superfície horizontal com atrito desprezível. Qual é a aceleração da caixa?

SOLUÇÃO

IDENTIFICAR: este problema envolve força e aceleração. Sempre que encontrar um problema deste tipo, você deve abordá-lo usando a segunda lei de Newton.

PREPARAR: os primeiros passos para resolver *qualquer* problema envolvendo forças são escolher o sistema de coordenadas e identificar todas as forças que atuam sobre o corpo em questão. Geralmente é conveniente tomar um eixo ao longo da direção da aceleração do corpo, que neste caso é horizontal, ou em oposição a ela. Escolhemos o eixo $+Ox$ no mesmo sentido da força (ou seja, a direção e o sentido em que a caixa acelera) e o eixo $+Oy$ apontando para cima (Figura 4.18). Na maioria dos problemas referentes à força (inclusive este), os vetores de força ficam em um plano e por isso o eixo Oz não é usado.
As forças que atuam sobre a caixa são (i) a força horizontal $\vec{F}$ exercida pelo trabalhador com módulo 20 N; (ii) o peso $\vec{p}$ da caixa, ou seja, a força de cima para baixo oriunda da atração gravitacional da Terra; e (iii) a força de reação de baixo para cima $\vec{n}$ exercida pela superfície sobre o corpo. Como na Seção 4.2, denominamos a força $\vec{n}$ de força *normal* porque ela é normal (perpendicular) à superfície de contato. (Usamos a letra n em itálico para não confundir com a abreviação N, reservada para o newton, unidade de força.) O enunciado diz que o atrito é desprezível, de modo que não incluímos nenhuma força de atrito. Como a caixa não se move verticalmente, a aceleração y é zero: $a_y = 0$. Nossa incógnita é o componente x da aceleração, a_x, que determinaremos usando a segunda lei de Newton na forma de componentes, conforme a Equação (4.8).

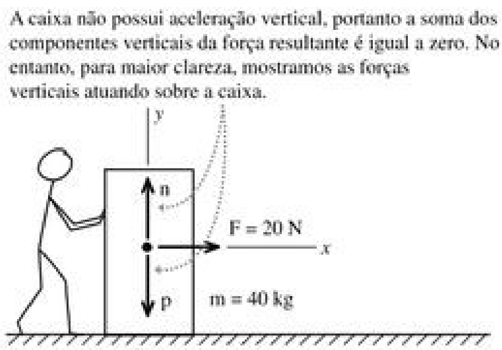


Figura 4.18 Nosso desenho desse problema. O piso sob a caixa acabou de ser encerado, por isso assumimos que o atrito é desprezível.

EXECUTAR: na Figura 4.18, apenas a força 20 N possui componente x diferente de zero. Logo, de acordo com a primeira relação na Equação (4.8)

$$\sum F_x = F = 20\ \text{N} = ma_x$$

Logo, o componente x da aceleração é

$$a_x = \frac{\sum F_x}{m} = \frac{20\ \text{N}}{40\ \text{kg}} = \frac{20\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2}{40\ \text{kg}} = 0{,}50\ \text{m/s}^2$$

AVALIAR: a aceleração possui a direção e o sentido do eixo $+Ox$, a mesma direção e o mesmo sentido da força resultante. A força resultante é constante, logo a aceleração também é constante. Caso fossem dadas a posição inicial e a velocidade inicial da caixa, poderíamos achar a posição e a velocidade em qualquer instante pela equação do movimento com aceleração constante que deduzimos no Capítulo 2.

Note que, para determinar a_x, não tivemos que usar o componente y da segunda lei de Newton dada pela Equação (4.8), $\sum F_y = ma_y$. Usando essa equação, você poderia demonstrar que o módulo n da força normal, nessa situação, é igual ao peso da caixa?

Exemplo 4.5

DETERMINAÇÃO DA FORÇA A PARTIR DA ACELERAÇÃO
Uma garçonete empurra uma garrafa de *ketchup* de massa igual a 0,45 kg ao longo de um balcão liso e horizontal. Quando a garrafa deixa sua mão, ela possui velocidade de 2,8 m/s, que depois diminui por causa do atrito horizontal constante exercido pela superfície superior do balcão. A garrafa percorre uma distância de 1,0 m até parar. Determine o módulo, a direção e o sentido da força de atrito que atua na garrafa.

SOLUÇÃO

IDENTIFICAR: como no Exemplo 4.4, este problema envolve forças e aceleração (a redução na velocidade do pote de *ketchup*), portanto usaremos a segunda lei de Newton para resolvê-lo.

PREPARAR: como no Exemplo 4.4, o primeiro passo é escolher o sistema de coordenadas e depois identificar as forças que atuam sobre o corpo (neste caso, o pote de *ketchup*). Conforme a Figura 4.19, escolhemos o eixo $+Ox$ no mesmo sentido em que desliza, sendo $x_0 = 0$ o ponto onde ela deixa a mão da garçonete com a velocidade inicial de 2,8 m/s. As forças que atuam sobre a garrafa também são indicadas na Figura 4.19. A força de atrito $\vec{f}$ atua para fazer diminuir a velocidade inicial do pote, de modo que seu sentido deve ser oposto ao da velocidade (veja a Figura 4.13c).

Nossa variável-alvo é o módulo f da força de atrito, que encontraremos usando o componente x da segunda lei de Newton, conforme a Equação (4.8). Para isso, primeiro necessitamos saber o componente x da aceleração do pote. O valor de a_x não é fornecido, mas sabemos que a força de atrito é constante. Logo, a aceleração também é constante e podemos calcular a_x usando uma das fórmulas da aceleração constante da Seção 2.4. Como conhecemos a coordenada x e a velocidade x iniciais ($x_0 = 0$, $v_{0x} = 2{,}8$ m/s), assim como as finais ($x = 1{,}0$ m, $v_x = 0$), a equação mais fácil de usar para determinar a_x é a Equação (2.13), $v_x^2 = v_{0x}^2 + 2a_x(x - x_0)$.

EXECUTAR: conforme a Equação (2.13),

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

$$a_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2(x - x_0)} = \frac{(0\ \text{m/s})^2 - (2{,}8\ \text{m/s})^2}{2(1{,}0\ \text{m} - 0\ \text{m})} = -3{,}9\ \text{m/s}^2$$

O sinal negativo indica que o sentido da aceleração é para a *esquerda*; a velocidade possui sentido contrário ao da aceleração, como é de se esperar, pois o pote está diminuindo de velocidade. A força resultante na direção de x é $-f$, o componente x da força de atrito, logo

$$\sum F_x = -f = ma_x = (0{,}45\ \text{kg})(-3{,}9\ \text{m/s}^2)$$
$$= -1{,}8\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2 = -1{,}8\ \text{N}$$

O sinal negativo indica novamente que o sentido da força é para a esquerda. O módulo da força de atrito é dado por $f = 1{,}8$ N. Lembre-se de que esse módulo é *sempre* positivo!

AVALIAR: escolhemos o eixo $+Ox$, na mesma direção e sentido do movimento do pote, de modo que a_x fosse negativo. Para conferir o resultado, tente repetir o cálculo com o eixo $+Ox$, no sentido *oposto* ao movimento (para a esquerda na Figura 4.19), de modo que a_x seja positivo. Nesse caso, você deve encontrar que $\sum F_x$ é igual a $+f$ (porque a força de atrito agora é na direção $+x$), que, por sua vez, é igual a $+1{,}8$ N. Suas respostas para os *módulos* das forças (que são sempre números positivos) nunca devem depender da sua escolha dos eixos das coordenadas!

Desenhamos um diagrama para o movimento do pote e outro para as forças que atuam sobre ele.

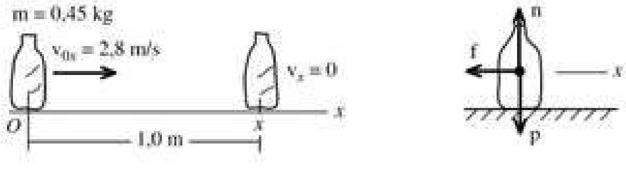


Figura 4.19 Nosso desenho desse problema.

Algumas observações sobre unidades

É conveniente fazer algumas observações sobre unidades. No sistema métrico cgs (não usado neste livro), a unidade de massa é o grama, igual a 10^{-3} kg, e a unidade de distância é o centímetro, igual a 10^{-2} m. A unidade de força correspondente denomina-se *dina:*

$$1\ \text{dina} = 1\ \text{g}\cdot\text{cm/s}^2 = 10^{-5}\ \text{N}$$

No sistema inglês, a unidade de força é a *libra* (ou libra-força) e a unidade de massa é o *slug* (Figura 4.20). A unidade de aceleração é 1 pé/s², logo,

$$1\ \text{libra} = 1\ \text{slug}\cdot\text{pé/s}^2$$

A definição oficial da libra é

$$1\ \text{libra} = 4{,}448221615260\ \text{newtons}$$

É útil lembrar que uma libra é aproximadamente 4,4 N e um newton é aproximadamente 0,22 libra. Da próxima vez que quiser pedir 'um quarto de libra', tente pedir 'um newton' para ver o que acontece. Outro fato útil: um corpo com massa de 1 kg possui peso de aproximadamente 2,2 lb na superfície terrestre.

Na Tabela 4.2 apresentamos um resumo das unidades de força, massa e aceleração dos três sistemas.

Tabela 4.2 Unidades de força, massa e aceleração

Sistema de Unidades	Força	Massa	Aceleração
SI	newton (N)	quilograma (kg)	m/s²
cgs	dina (dyn)	grama (g)	cm/s²
Inglês	libra (lb)	slug	pés/s²

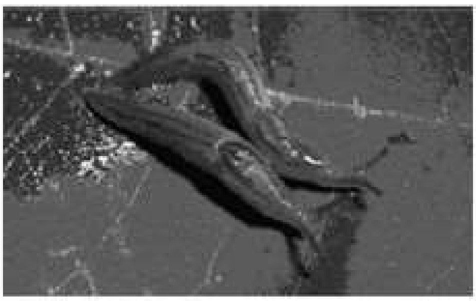


Figura 4.20 Uma lesma típica de jardim possui massa aproximadamente igual a 10^{-3} slug ou cerca de 15 gramas.

Teste sua compreensão da Seção 4.3 Classifique as seguintes situações por ordem crescente de módulo da aceleração do objeto. Há algum caso com o mesmo módulo de aceleração? i) Um objeto de 2,0 kg que sofre uma força resultante de 2,0 N; ii) Um objeto de 2,0 kg que sofre uma força resultante de 8,0 N; iii) Um objeto de 8,0 kg que sofre uma força resultante de 2,0 N; iv) Um objeto de 8,0 kg que sofre uma força resultante de 8,0 N. ▮

4.4 Massa e peso

O *peso* de um corpo é uma das forças mais familiares que a Terra exerce sobre o corpo. (Quando você estiver em outro planeta, seu peso será a força gravitacional que o planeta exerce sobre você.) Infelizmente, os termos *massa* e *peso* em geral são mal empregados e considerados sinônimos em nossa conversação cotidiana. É extremamente importante que você saiba a diferença entre estas duas grandezas físicas.

A massa caracteriza a propriedade da *inércia* de um corpo. Por causa de sua massa, a louça fica praticamente em repouso sobre a mesa quando você puxa repentinamente a toalha. Quanto maior a massa, maior a força necessária para produzir uma dada aceleração; isso se reflete na segunda lei de Newton, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$.

O peso de um corpo, por outro lado, é a *força* de atração gravitacional exercida pela Terra sobre o corpo. Massa e peso se relacionam: um corpo que possui massa grande também possui peso grande. É difícil lançar horizontalmente uma pedra grande porque ela possui *massa* grande, e é difícil levantá-la porque ela possui *peso* grande.

Para compreender a relação entre massa e peso, note que um corpo em queda livre possui uma aceleração igual a g, e de acordo com a segunda lei de Newton uma força deve produzir essa aceleração. Quando um corpo de 1 kg cai com aceleração igual a 9,8 m/s^2, a força necessária possui o seguinte módulo

$$F = ma = (1\ \text{kg})\ (9{,}8\ \text{m/s}^2) = 9{,}8\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9{,}8\ \text{N}$$

A força que faz o corpo acelerar de cima para baixo é o *peso* do corpo. Qualquer corpo próximo da superfície da Terra que possua massa de 1 kg *deve* possuir um peso igual a 9,8 N para que ele tenha a aceleração que observamos quando o corpo está em queda livre. Generalizando, qualquer corpo de massa m deve possuir um peso com módulo p dado por

$$p = mg \text{ (módulo do peso de um corpo de massa } m) \qquad (4.9)$$

Logo, o módulo p do peso de um corpo é diretamente proporcional à sua massa m. O peso de um corpo é uma força, uma grandeza vetorial, de modo que podemos escrever a Equação (4.9) como uma equação vetorial (Figura 4.21):

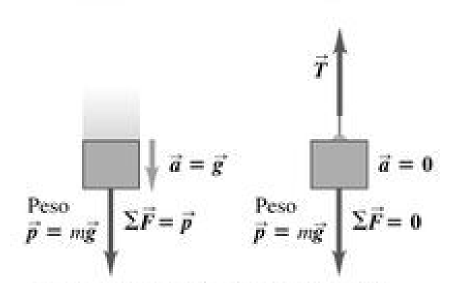


Figura 4.21 A relação entre massa e peso.

$$\vec{p} = m\vec{g} \qquad (4.10)$$

Lembre-se de que g é o *módulo* de $\vec{g}$, a aceleração da gravidade, logo, g é sempre um número positivo. Portanto, p, dado pela Equação (4.9), é o *módulo* do peso e também é sempre um número positivo.

ATENÇÃO O peso de um corpo atua eternamente É importante assinalar que o peso de um corpo atua *eternamente* sobre o corpo, independentemente de ele estar ou não em queda livre. Quando um objeto de 10 kg está em equilíbrio, suspenso por uma corrente, sua aceleração é igual a zero. Porém, seu peso, dado pela Equação (4.10), continua puxando-o para baixo (Figura 4.21). Nesse caso, a corrente exerce uma força que puxa o objeto de baixo para cima. A *soma vetorial* das forças é igual a zero, mas o peso ainda atua.

Exemplo conceitual 4.6

FORÇA RESULTANTE E ACELERAÇÃO EM QUEDA LIVRE
No Exemplo 2.6 (Seção 2.5), uma moeda de um euro foi largada do repouso, do alto da Torre Inclinada de Pisa. Se a moeda cai em queda livre, de modo que os efeitos do ar sejam desprezíveis, como a força resultante sobre ela varia durante a queda?

SOLUÇÃO

Em queda livre, a aceleração $\vec{a}$ da moeda é constante e igual a $\vec{g}$. Portanto, de acordo com a segunda lei de Newton, a força resultante $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ também é constante e igual a $m\vec{g}$, que é o peso da moeda $\vec{p}$ (Figura 4.22). A velocidade da moeda varia enquanto

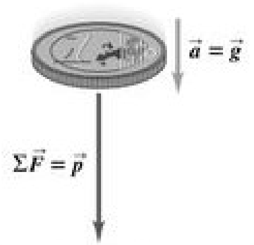


Figura 4.22 A aceleração de um objeto em queda livre é constante, assim como a força resultante que atua sobre o objeto.

ela cai, mas a força resultante que atua sobre ela permanece constante. Se isso lhe causou alguma surpresa, deve ser porque ainda acredite no 'senso comum' errôneo de que maior velocidade escalar implica em maior força. Nesse caso, você deve reler o Exemplo Conceitual 4.3.

A força resultante sobre uma moeda em queda livre é constante, mesmo que você inicialmente a jogue de baixo para cima. A força que sua mão exerceu sobre a moeda ao jogá-la é uma força de contato, que desaparece no instante em que a moeda perde contato com sua mão. A partir daí, a única força que atua sobre a moeda é seu peso $\vec{p}$.

Variação de g com o local

Usaremos $g = 9{,}80\ \text{m/s}^2$ para os problemas na superfície da Terra (ou, se os outros dados no problema forem fornecidos com apenas dois números significantes, $g = 9{,}8\ \text{m/s}^2$). Na realidade, o valor de g varia de um ponto a outro na superfície da Terra, desde aproximadamente $9{,}78\ \text{m/s}^2$ até aproximadamente $9{,}82\ \text{m/s}^2$, porque a Terra não é uma esfera perfeita e devido à sua rotação e seu movimento orbital. Em um ponto onde $g = 9{,}80\ \text{m/s}^2$, o peso de um quilograma padrão é igual a $p = 9{,}80$ N. Em outro ponto onde $g = 9{,}78\ \text{m/s}^2$, o peso de um quilograma seria $p = 9{,}78$ N, porém sua massa continuaria igual a 1 kg. O peso de um corpo varia de um local para outro; a massa, não.

Se levarmos um quilograma padrão para a superfície da Lua, onde a aceleração de um corpo em queda livre é de $1{,}62\ \text{m/s}^2$ (o valor de g na superfície da Lua), seu peso será 1,62 N, porém sua massa continuará igual a 1 kg (Figura 4.23). Um astronauta de 80,0 kg pesa na Terra (80,0 kg) ($9{,}80\ \text{m/s}^2$) = 784 N, mas na Lua o peso desse astronauta seria apenas (80,0 kg) ($1{,}62\ \text{m/s}^2$) = 130 N. No Capítulo 12, veremos como calcular o valor de g na superfície da Lua ou em outros mundos.

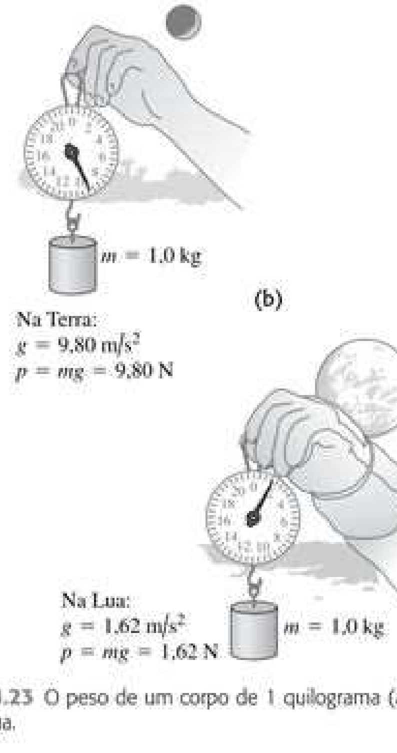


Figura 4.23 O peso de um corpo de 1 quilograma (a) na Terra e (b) na Lua.

Medidas da massa e do peso

Na Seção 4.3 descrevemos um método para avaliar massas estruturado na comparação da aceleração de cada massa submetida à mesma força resultante. Contudo, normalmente, o método mais simples para avaliar a massa de um corpo consiste em medir o seu peso, geralmente mediante comparação a um padrão. De acordo com a Equação (4.9), dois corpos que possuem o mesmo peso no mesmo local devem possuir a mesma massa. Podemos comparar pesos de modo muito preciso; a familiar balança de braços iguais (Figura 4.24) permite isso com grande precisão (até 1 parte em 10^6), visto que, quando dois corpos possuem o mesmo peso no mesmo local, eles possuem a mesma massa. (Esse método não poderia ser usado em regiões do espaço sideral com valor aparente de 'gravidade nula'. Nesse caso, devemos aplicar uma dada força ao corpo, medir sua aceleração e obter a massa pela razão entre força e aceleração. Esse método, ou variantes dele, é utilizado para medir a massa de um astronauta no espaço, bem como as massas de partículas atômicas e subatômicas.)

O conceito de massa desempenha dois papéis bastante diferentes na mecânica. O peso de um corpo (a força da atração gravitacional sobre o corpo) é proporcional à sua massa; podemos denominar essa propriedade do corpo de *massa gravitacional*. Por outro lado, a propriedade inercial decorrente da segunda lei de Newton pode ser chamada de *massa inercial*. Se essas duas quantidades fossem diferentes, a aceleração da gravidade poderia ser diferente para corpos diferentes. Contudo, experiências com extraordinária precisão estabeleceram que essas massas *são* iguais, com precisão superior a uma parte em 10^{12}.

ATENÇÃO Não confunda massa com peso As unidades SI de massa e de peso são freqüentemente mal empregadas em nosso cotidiano. Expressões incorretas como 'Esta caixa pesa 6 kg' são quase universalmente usadas. Essa frase significa que a *massa* da caixa, provavelmente determinada indiretamente por *pesagem*, é igual a 6 kg. Tome cuidado para evitar esse tipo de erro nos seus trabalhos! Em unidades SI, o peso (uma força) é medido em newtons, enquanto a massa é medida em quilogramas.

Exemplo 4.7

MASSA E PESO Um carro de $2{,}49 \times 10^4$ N em movimento ao longo do eixo $+Ox$ pára repentinamente; o componente x da força resultante que atua sobre o carro é $-1{,}83 \times 10^4$ N. Qual é sua aceleração?

SOLUÇÃO

IDENTIFICAR: usaremos novamente a segunda lei de Newton para relacionar força e aceleração. Para aplicar essa relação, necessitamos conhecer a massa do carro. Entretanto, como o newton é uma unidade de força, sabemos que $2{,}49 \times 10^4$ N é o peso do carro, não a sua massa. Logo, também usaremos a relação entre a massa de um corpo e o seu peso.

PREPARAR: nossa variável-alvo é o componente x da aceleração do carro, a_x. (O movimento é puramente orientado na direção do eixo x.) Usamos a Equação (4.9) para determinar a massa do carro a partir do seu peso e depois usamos o componente x da segunda lei de Newton, dada pela Equação (4.8), para determinar a_x.

EXECUTAR: a massa m do carro é

$$m = \frac{p}{g} = \frac{2{,}49 \times 10^4\ \text{N}}{9{,}80\ \text{m/s}^2} = \frac{2{,}49 \times 10^4\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2}{9{,}80\ \text{m/s}^2}$$
$$= 2540\ \text{kg}$$

Como $\sum F_x = ma_x$, obtemos

$$a_x = \frac{\sum F_x}{m} = \frac{-1{,}83 \times 10^4\ \text{N}}{2540\ \text{kg}} = \frac{-1{,}83 \times 10^4\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2}{2540\ \text{kg}}$$
$$= -7{,}20\ \text{m/s}^2$$

AVALIAR: o sinal negativo significa que o vetor de aceleração aponta na direção $-Ox$. Isso faz sentido: o carro se desloca na direção $+Ox$ e está reduzindo a velocidade.

Note que a aceleração pode também ser escrita como $-0{,}735\,g$. Vale mencionar que $-0{,}735$ também é a razão de $-1{,}83 \times 10^4$ N (o componente x da força resultante) por $2{,}49 \times 10^4$ N (o peso). Na verdade, a aceleração de um corpo expressa como um múltiplo de g sempre é igual à razão da força resultante sobre o corpo pelo seu peso. Você sabe por quê?

Teste sua compreensão da Seção 4.4 Suponha que um astronauta aterrisse em um planeta onde $g = 19{,}6$ m/s². Em comparação com a Terra, caminhar seria mais fácil, mais difícil ou igual? E apanhar uma bola que se move horizontalmente a 12 m/s? (Considere que a roupa do astronauta é um modelo leve, que não restringe em nada os seus movimentos.) ▮

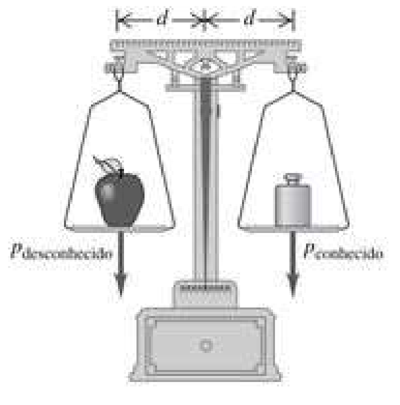


Figura 4.24 Uma balança de braços iguais determina a massa de um corpo (como maçã) comparando o seu peso a um dado peso.

4.5 Terceira lei de Newton

Uma força atuando sobre um corpo é sempre o resultado de uma interação com outro corpo, de modo que as forças sempre ocorrem em pares. Você não pode puxar a maçaneta de uma porta sem que ela empurre você para trás. Quando você chuta uma bola, a força para a frente que seu pé exerce sobre ela faz a bola mover-se ao longo da sua trajetória, porém, você sente a força que a bola exerce sobre seu pé. Quando você chuta uma rocha, a dor que você sente decorre da força que a rocha exerce sobre seu pé.

Em cada um dos casos acima, a força que você exerce sobre o corpo é igual e contrária à força que o corpo exerce sobre você. A experiência mostra que, quando dois corpos interagem, as duas forças decorrentes da interação possuem sempre o *mesmo módulo* e a *mesma direção, mas sentidos contrários*. Esse resultado denomina-se *terceira lei de Newton*.

Quando um corpo *A* exerce uma força sobre um corpo *B* (uma 'ação'), então, o corpo *B* exerce uma força sobre o corpo *A* (uma 'reação'). Essas duas forças têm o mesmo módulo e a mesma direção, mas possuem sentidos contrários. Essas duas forças atuam em corpos diferentes.

Na Figura 4.25, $\vec{F}_{A\ \text{em}\ B}$ é a força exercida *pelo* corpo *A* (primeiro índice inferior) *sobre* o corpo *B* (segundo índice inferior) e $\vec{F}_{B\ \text{em}\ A}$ é a força exercida *pelo* corpo *B* (primeiro índice inferior) *sobre* o corpo *A* (segundo índice inferior). O enunciado matemático da terceira lei de Newton é:

$$\vec{F}_{A\ \text{em}\ B} = -\vec{F}_{B\ \text{em}\ A} \qquad (4.11)$$
(terceira lei de Newton)

Não importa se um corpo é inanimado (como a bola de futebol na Figura 4.25) e o outro não (como a pessoa que chuta): eles necessariamente exercem forças mútuas que seguem a Equação (4.11).

Nesse enunciado, a 'ação' e a 'reação' são duas forças opostas (na Figura 4.25, $\vec{F}_{A\ \text{em}\ B}$ e $\vec{F}_{B\ \text{em}\ A}$); algumas vezes nos referimos a elas como um **par de ação e reação**. Isso *não* significa nenhuma relação de causa e efeito; qualquer uma das forças pode ser considerada como a 'ação' ou como a 'reação'. Algumas vezes dizemos simplesmente que as forças são 'iguais e contrárias', querendo dizer que elas têm o mesmo módulo e a mesma direção, mas possuem sentidos contrários.

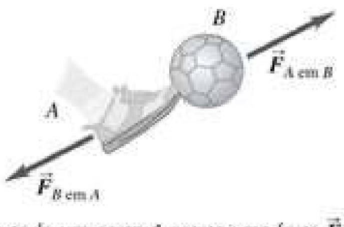


Figura 4.25 Quando um corpo *A* exerce uma força $\vec{F}_{A\ \text{em}\ B}$, então o corpo *B* exerce uma força $\vec{F}_{B\ \text{em}\ A}$, que possui o mesmo módulo e a mesma direção, mas sentido contrário: $\vec{F}_{A\ \text{em}\ B} = -\vec{F}_{B\ \text{em}\ A}$.

ATENÇÃO As duas forças no par de ação e reação atuam sobre corpos diferentes Enfatizamos que as duas forças descritas na terceira lei de Newton atuam em corpos *diferentes*. Isso é importante na solução de problemas envolvendo a primeira ou a segunda lei de Newton, que dizem respeito a forças que atuam sobre um corpo. Por exemplo, a força resultante que atua sobre a bola da Figura 4.25 é a soma vetorial do peso da bola com a força $\vec{F}_{A\ em\ B}$ que o pé exerce sobre a bola. Nessa soma você não deve incluir a força $\vec{F}_{B\ em\ A}$ porque essa força é exercida sobre o pé e não sobre a bola.

Na Figura 4.25, a ação e a reação são forças *de contato* que estão presentes somente enquanto os dois corpos se tocam. Porém, a terceira lei de Newton também se aplica para as forças de *longo alcance* que não necessitam do contato físico entre os corpos, como no caso da atração gravitacional. Uma bola de pingue-pongue exerce sobre a Terra uma força gravitacional de baixo para cima de mesmo módulo que a força gravitacional de cima para baixo exercida pela Terra sobre a bola. Quando você deixa a bola cair, a bola e a Terra se aproximam. O módulo da força resultante sobre cada um desses corpos é o mesmo, mas a aceleração da Terra é extremamente microscópica por causa de sua massa gigantesca. Contudo, ela se move!

Exemplo conceitual 4.8

QUAL FORÇA É MAIOR? Seu carro esportivo enguiça, e você o empurra até a oficina mais próxima. Quando o carro está começando a se mover, como a força que você exerce sobre o carro se compara com a força que o carro exerce sobre você? Como essas forças se comparam quando você empurra o carro com velocidade escalar constante?

SOLUÇÃO

Nos *dois* casos, a força que você exerce sobre o carro é igual e contrária à força que o carro exerce sobre você. É verdade que a força que você faz para iniciar o movimento é bem maior do que a força que você faz para deslocá-lo com velocidade constante. Porém, qualquer que seja a força que você faça sobre o carro, o carro exercerá sobre você uma força igual e contrária. A terceira lei de Newton sempre se aplica, estejam os corpos em repouso, movendo-se com velocidade constante ou acelerando.

Você poderá se perguntar como o carro 'sabe' empurrar de volta com o mesmo módulo de força que você exerce sobre ele. Talvez ajude lembrar que as forças que você e o carro exercem mutuamente são, de fato, interações entre os átomos na superfície da sua mão e os átomos na superfície do carro. Essas interações são análogas a molas em miniatura entre átomos adjacentes, e uma mola comprimida exerce forças igualmente potentes sobre ambas as extremidades.

Fundamentalmente, porém, sabemos que objetos de massas diferentes exercem forças recíprocas igualmente potentes porque a *experiência nos mostra isso*. Nunca se esqueça de que a física não é uma mera coleção de regras e equações; mais do que isso, trata-se de uma descrição sistemática do mundo natural baseada em experiência e observação.

Exemplo conceitual 4.9

APLICAÇÃO DA TERCEIRA LEI DE NEWTON: OBJETOS EM REPOUSO Uma maçã está em repouso sobre uma mesa. Quais são as forças que atuam sobre ela? Quais são as forças de reação a cada uma das forças que atuam sobre ela? Quais são os pares de ação e reação?

SOLUÇÃO

A Figura 4.26a mostra as forças que atuam sobre a maçã. No diagrama, $\vec{F}_{\text{Terra sobre a maçã}}$ é o peso da maçã, isto é, a força gravitacional de cima para baixo exercida *pela* Terra (primeiro índice inferior) *sobre* a maçã (quarto índice inferior). Analogamente, $\vec{F}_{\text{mesa sobre a maçã}}$ é a força de baixo para cima exercida *pela* mesa (primeiro índice inferior) *sobre* a maçã (quarto índice inferior).

Conforme a Terra puxa a maçã para baixo, a maçã puxa a Terra para cima com uma força $\vec{F}_{\text{maçã sobre a Terra}}$ de mesma intensidade, conforme mostra a Figura 4.26b. As forças $\vec{F}_{\text{maçã sobre a Terra}}$ e $\vec{F}_{\text{Terra sobre a maçã}}$ constituem um par de ação e reação, representando a interação mútua entre a maçã e a Terra, logo:

$$\vec{F}_{\text{maçã sobre a Terra}} = -\vec{F}_{\text{Terra sobre a maçã}}$$

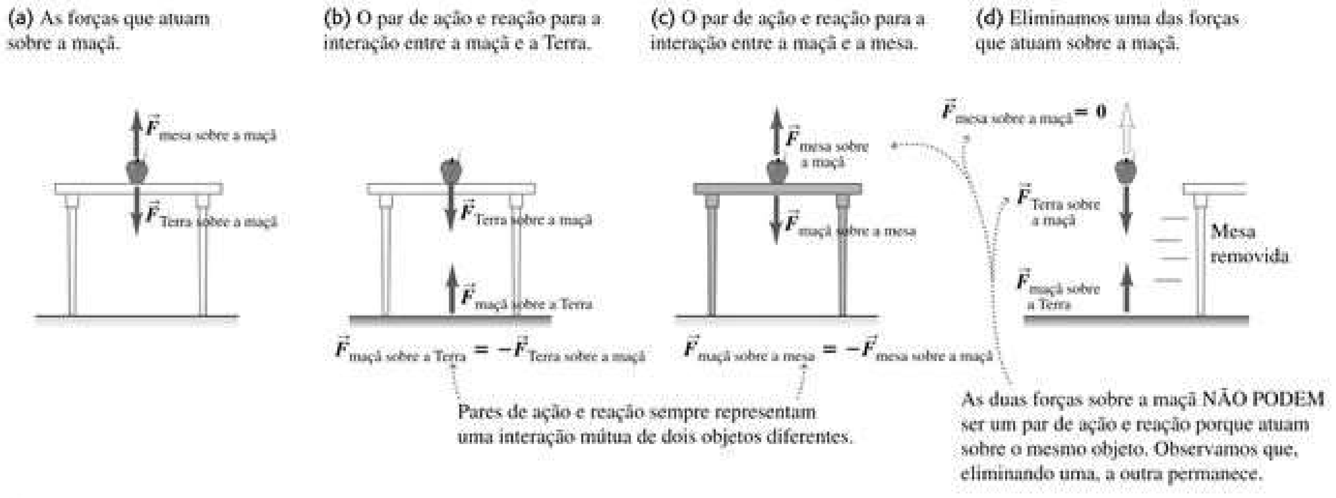


Figura 4.26 As duas forças em um par de ação e reação sempre atuam sobre corpos diferentes.

Também, como a mesa empurra a maçã para cima com uma força $\vec{F}_{\text{mesa sobre a maçã}}$, a reação correspondente é a força para baixo $\vec{F}_{\text{maçã sobre a mesa}}$ exercida pela maçã sobre a mesa (Figura 4.26c). Portanto,

$$\vec{F}_{\text{maçã sobre a mesa}} = -\vec{F}_{\text{mesa sobre a maçã}}$$

As duas forças que atuam sobre a maçã são $\vec{F}_{\text{mesa sobre a maçã}}$ e $\vec{F}_{\text{Terra sobre a maçã}}$. Elas constituem um par de ação e reação? Não, elas não formam esse par, ainda que sejam iguais e de sinais contrários. Elas não representam a interação mútua entre dois corpos; são duas forças diferentes que atuam sobre o *mesmo* corpo. *As duas forças de um par de ação e reação* ***nunca*** *atuam sobre o mesmo corpo.* Vejamos outro modo de examinar a questão. Suponha que você retire repentinamente a mesa onde a maçã repousa (Figura 4.26d). Agora, as duas forças $\vec{F}_{\text{maçã sobre a mesa}}$ e $\vec{F}_{\text{mesa sobre a maçã}}$ tornam-se nulas, porém, $\vec{F}_{\text{maçã sobre a Terra}}$ e $\vec{F}_{\text{Terra sobre a maçã}}$ continuam presentes (a força gravitacional continua atuando). Como $\vec{F}_{\text{mesa sobre a maçã}}$ é agora igual a zero, ela não é igual e oposta a $\vec{F}_{\text{terra sobre a maçã}}$. Portanto, este par não pode ser um par de ação e reação.

Exemplo conceitual 4.10

APLICAÇÃO DA TERCEIRA LEI DE NEWTON: OBJETOS EM MOVIMENTO Um pedreiro arrasta um bloco de mármore em um piso, puxando-o por meio de uma corda amarrada ao bloco (Figura 4.27a). O bloco pode ou não estar em equilíbrio. Como as diversas forças estão relacionadas? Quais são os pares de ação e reação?

SOLUÇÃO

Usaremos índices inferiores em todas as forças para auxiliar as explicações: o bloco (B), a corda (C) e o pedreiro (P). O vetor $\vec{F}_{\text{P em C}}$ representa a força exercida pelo *pedreiro* sobre a *corda*. Sua reação é a força igual e oposta $\vec{F}_{\text{C em P}}$ exercida pela *corda* sobre o *pedreiro*. O vetor $\vec{F}_{\text{C em B}}$ representa a força exercida pela *corda* sobre o *bloco*. Sua reação é a força igual e oposta $\vec{F}_{\text{B em C}}$ exercida pelo *bloco* sobre a *corda*. Para esses dois pares de ação e reação (Figura 4.27b), temos

$$\vec{F}_{\text{C em P}} = -\vec{F}_{\text{P em C}} \qquad \text{e} \qquad \vec{F}_{\text{B em C}} = -\vec{F}_{\text{C em B}}$$

Certifique-se de que você entendeu por que as forças $\vec{F}_{\text{P em C}}$ e $\vec{F}_{\text{B em C}}$ *não* constituem um par de ação e reação (Figura 4.27c). Essas duas forças atuam sobre o *mesmo* corpo (a corda), enquanto as duas forças de um par de ação e reação sempre *atuam* sobre corpos *diferentes*. Além disso, as forças $\vec{F}_{\text{P em C}}$ e $\vec{F}_{\text{B em C}}$ não possuem necessariamente o mesmo módulo. Aplicando a segunda lei de Newton, obtemos

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{\text{P em R}} + \vec{F}_{\text{B em R}} = m_{\text{corda}}\vec{a}_{\text{corda}}$$

Se o bloco e a corda estão acelerados (ou seja, aumentando ou reduzindo a velocidade escalar), a corda não está em equilíbrio e $\vec{F}_{\text{P em C}}$ possui módulo diferente do módulo de $\vec{F}_{\text{B em C}}$. Em contraste, o par de ação e reação $\vec{F}_{\text{P em C}}$ e $\vec{F}_{\text{C em P}}$ possui sempre o mesmo módulo, como também $\vec{F}_{\text{C em B}}$ e $\vec{F}_{\text{B em C}}$. A terceira lei de Newton vale sempre, tanto para um corpo em repouso quanto para um corpo em aceleração.

No caso especial de uma corda em equilíbrio, a força $\vec{F}_{\text{P em C}}$ possui o mesmo módulo da força $\vec{F}_{\text{B em C}}$. Esse caso, porém, é um exemplo da *primeira* lei de Newton e não da *terceira* lei de Newton. Outro modo de examinar a questão é que, em equilíbrio, $\vec{a}_{\text{corda}} = \mathbf{0}$ na equação anterior. Então, $\vec{F}_{\text{B em C}} = -\vec{F}_{\text{P em C}}$ em virtude da primeira ou da segunda lei de Newton.

Isso também é verdade quando a corda é acelerada, mas sua massa é desprezível em comparação com a massa do pedreiro ou do bloco. Nesse caso, $m_{\text{corda}} = 0$ na equação anterior, portanto novamente $\vec{F}_{\text{B em C}} = -\vec{F}_{\text{P em C}}$. Uma vez que, pela terceira lei de Newton, $\vec{F}_{\text{B em C}}$ é *sempre* igual a $-\vec{F}_{\text{C em B}}$ (elas constituem um par de ação e reação), nesses mesmos casos especiais, $\vec{F}_{\text{C em B}}$ é também igual a $\vec{F}_{\text{P em C}}$. Em outras palavras, nesses casos, a força da corda sobre o bloco é igual à força do pedreiro sobre a corda, e podemos imaginar que a corda 'transmite' ao bloco, sem nenhuma variação, a força que a pessoa exerce sobre a corda. Esse ponto de vista é útil, mas você deve se lembrar de que ele vale *apenas* quando a corda estiver em equilíbrio ou quando sua massa for desprezível.

Caso você, neste momento, esteja confundindo os índices inferiores, respire fundo. Repasse novamente essa discussão, comparando os símbolos com os diagramas vetoriais, até ter segurança dos conceitos envolvidos.

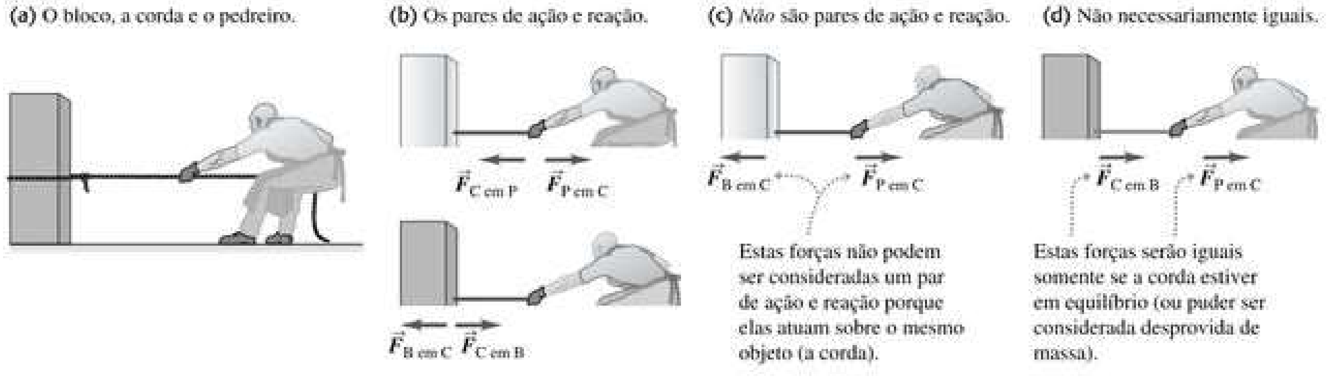


Figura 4.27 Identificação das forças em ação, quando um pedreiro puxa uma corda amarrada a um bloco.

Exemplo conceitual 4.11

UM PARADOXO DA TERCEIRA LEI DE NEWTON? No Exemplo 4.10, observamos que o pedreiro puxa com toda força a combinação corda-bloco, que o puxa de volta. Por que, então, o bloco se move enquanto o pedreiro permanece estacionário?

SOLUÇÃO

A solução para esse aparente enigma está na diferença entre a *segunda* lei de Newton e a *terceira* lei de Newton. As únicas forças envolvidas na segunda lei de Newton são aquelas que atuam *sobre* o corpo. O vetor soma dessas forças determina como o corpo acelera (e se de fato acelera). Em contraposição, a terceira lei de Newton relaciona as forças que dois corpos *diferentes* exercem mutuamente. Somente a terceira lei não revela nada sobre o movimento de qualquer um dos corpos.

Se a combinação corda-bloco está inicialmente em repouso, ela começa a deslizar se o pedreiro exercer uma força $\vec{F}_{\text{P em C}}$ que tenha módulo *maior* que a força de atrito exercida pelo piso sobre o bloco (Figura 4.28). (O bloco de mármore possui uma base lisa, que ajuda a minimizar o atrito.) Logo, existe uma força resultante sobre a combinação corda-bloco orientada para a direita e, por isso, ela acelera para a direita. Em contraposição, o pedreiro *não* se move porque a força resultante que atua sobre ele é *nula*. Ele calça sapatos com sola antiderrapante, que não escorrega no piso, de modo que a força de atrito exercida pelo piso sobre ele é forte o suficiente para contrabalançar na medida exata o puxão da corda, $\vec{F}_{\text{C em P}}$. (Tanto o bloco quanto o pedreiro também sentem uma força gravitacional de cima para baixo e uma força normal de baixo para cima exercida pelo piso. Como elas se equilibram entre si e se anulam, não as incluímos na Figura 4.28.)

Assim que o bloco começa a se mover, o pedreiro não precisa puxar com tanta força; ele precisa exercer somente uma força suficiente para contrabalançar a força de atrito sobre o bloco. Logo, a força resultante sobre o bloco que se move é igual a zero, e o bloco continua a se mover em direção ao pedreiro a uma velocidade constante, de acordo com a primeira lei de Newton.

Concluímos que o bloco se move enquanto o pedreiro fica parado, porque diferentes valores de atrito atuam sobre eles. Se o piso estivesse encerado, de modo que houvesse pouco atrito entre ele e os sapatos do pedreiro, o ato de puxar a corda faria o bloco deslizar para a direita *e* o pedreiro deslizar para a esquerda.

Esse exemplo ensina que, ao analisar o movimento de um corpo, você deve lembrar que somente as forças que atuam *sobre* o corpo determinam o seu movimento. Sob esse ponto de vista, a terceira lei de Newton é meramente uma ferramenta que pode ajudar a determinar quais são essas forças.

Quando um corpo, como a corda indicada na Figura 4.27, possui forças aplicadas em suas extremidades, dizemos que ele está sob *tensão*. A **tensão** em qualquer ponto é o módulo da força que atua nesse ponto (veja Figura 4.2c). Na Figura 4.27b, a tensão na extremidade direita da corda é o módulo de $\vec{F}_{\text{P em C}}$ (ou $\vec{F}_{\text{C em P}}$), e a tensão na extremidade esquerda da corda é dada pelo módulo de $\vec{F}_{\text{B em C}}$ (ou $\vec{F}_{\text{C em B}}$). Quando a corda está em equilíbrio e quando nenhuma força atua em suas extremidades, a tensão é a *mesma* nas extremidades e através da corda. Portanto, caso seja de 50 N o módulo de cada uma das forças $\vec{F}_{\text{B em C}}$ e $\vec{F}_{\text{P em C}}$, então a tensão na corda será de 50 N (*e não de* 100 N). O vetor força *resultante* $\vec{F}_{\text{B em C}} + \vec{F}_{\text{P em C}}$ que atua sobre a corda, nesse caso, é igual a zero!

Mais uma vez, enfatizamos uma verdade fundamental: as duas forças de um par de ação e reação *nunca* atuam sobre o mesmo corpo. Lembre-se de que esse fato simples pode ajudá-lo a esclarecer dúvidas sobre um par de ação e reação e sobre a terceira lei de Newton.

Teste sua compreensão da Seção 4.5 Você está dirigindo em uma estrada rural quando um mosquito se espatifa no seu pára-brisa. Qual força possui módulo maior: a que o carro exerce sobre o mosquito ou a que o mosquito exerce sobre o carro? Ou os módulos são iguais? Se são diferentes, como relacionar esse fato com a terceira lei de Newton? Se são iguais, por que o mosquito se espatifou ao passo que o carro ficou intacto? ❚

4.6 Exemplos de diagramas do corpo livre

As três leis de Newton contêm todos os princípios básicos necessários para a solução de uma grande variedade de problemas de mecânica. Essas leis possuem formas muito simples, mas sua aplicação em situações específicas

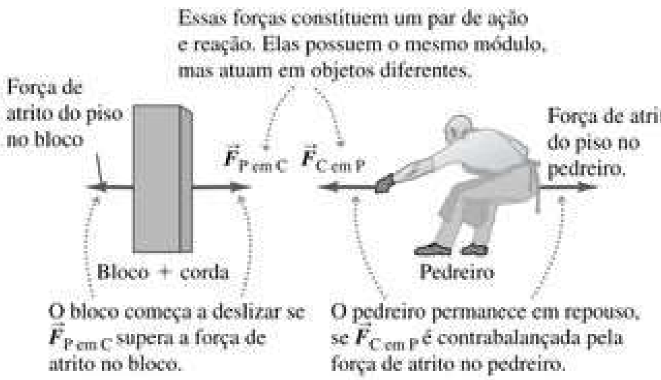


Figura 4.28 As forças horizontais que atuam sobre a combinação bloco-corda (à esquerda) e o pedreiro (à direita). (As forças verticais não são mostradas.)

pode apresentar desafios reais. Esta seção apresenta três noções e técnicas úteis na solução de quaisquer problemas referentes às leis de Newton. Você aprenderá outras no Capítulo 5, que estende o uso das leis de Newton a situações mais complexas.

1. *A primeira e a segunda leis de Newton se aplicam a um corpo específico.* Quando você usar a primeira lei de Newton, $\sum \vec{F} = \mathbf{0}$, para uma situação de equilíbrio, ou a segunda lei de Newton, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$, para uma situação sem equilíbrio, você deve definir logo de início o corpo sobre o qual você está falando. Isso pode parecer trivial, mas não é.
2. *Só importam as forças que atuam sobre o corpo.* A soma $\sum \vec{F}$ inclui todas as forças que atuam *sobre* o corpo em questão. Portanto, depois de escolher o corpo a ser analisado, você deve identificar todas as forças que atuam sobre ele. Não confunda as forças que atuam sobre esse corpo com as forças exercidas por ele sobre outros corpos. Por exemplo, para analisar uma pessoa caminhando, você deve incluir em $\sum \vec{F}$ a força que o solo exerce sobre a pessoa enquanto ela caminha, mas *não* a força que a pessoa exerce sobre o solo (Figura 4.29). Essas forças formam um par de ação e reação e estão relacionadas à terceira lei de Newton, mas somente o membro do par que atua sobre o corpo que você está analisando é que entra em $\sum \vec{F}$.
3. *Os diagramas do corpo livre são essenciais para ajudar a identificar as forças relevantes.* Um **diagrama do corpo livre** é um diagrama que mostra o corpo escolhido 'livre' das suas vizinhanças, com vetores desenhados para mostrar o módulo, a direção e o sentido de todas as forças que atuam sobre o corpo e que são resultantes de vários outros corpos que interagem com ele. Já mostramos alguns diagramas do corpo livre nas figuras 4.18, 4.19, 4.21 e 4.26a. Seja cuidadoso e não se esqueça de incluir todas as forças que atuam *sobre* o corpo, tomando cuidado para *não* incluir as forças que esse corpo exerce sobre outros corpos. Em particular, as duas forças de um par de ação e reação *nunca* devem aparecer em um diagrama do corpo livre, porque elas nunca atuam sobre o mesmo corpo. Além disso, as forças que um corpo exerce sobre si mesmo nunca devem aparecer, porque forças internas não afetam o movimento do corpo.

ATENÇÃO Forças em diagramas do corpo livre Quando você possui um diagrama do corpo livre *deve* ser capaz de responder a cada uma das forças da seguinte pergunta: 'Que outro corpo está aplicando essa força?' Caso você não possa responder a essa pergunta, poderá estar considerando uma força inexistente. Fique especialmente alerta para evitar forças inexistentes, tais como 'a força da aceleração' ou 'a força $m\vec{a}$', discutida na Seção 4.3.

Quando o problema envolve mais de um corpo, você deve separar os corpos e desenhar um diagrama do corpo livre para cada corpo. Por exemplo, a Figura 4.27c mostra um diagrama do corpo livre separado para o caso em que a corda é considerada sem massa (de modo que nenhuma força gravitacional atua sobre ela). A Figura 4.28 também mostra diagramas para o pedreiro e para o bloco, mas estes *não* são diagramas do corpo livre completos porque não mostram todas as forças que atuam sobre cada corpo. (Não mencionamos as forças verticais – a força de peso exercida pela Terra e a força normal de baixo para cima exercida pelo piso.)

Figura 4.29 O simples fato de caminhar depende basicamente da terceira lei de Newton. Para se mover para a frente, você empurra o solo para trás com os pés. Em reação, o solo empurra seus pés (e, portanto, todo o seu corpo) com uma força para a frente de mesmo módulo. Essa força *externa* fornecida pelo solo é que produz a aceleração de seu corpo para a frente.

A Figura 4.30 na página 126 apresenta algumas situações reais e os respectivos diagramas do corpo livre completos. Note que, em cada situação, uma pessoa exerce uma força sobre algo que a cerca, mas a força que aparece no diagrama do corpo livre dessa pessoa é a força que aquilo que a cerca exerce de volta *sobre* ela.

Teste sua compreensão da Seção 4.6 A força de flutuação mostrada na Figura 4.30c é a metade de um par de ação e reação. Qual é a força que completa esse par? i) O peso da mergulhadora; ii) A força que impele para a frente; iii) A força que puxa para trás; iv) A força descendente que a mergulhadora exerce sobre a água; v) A força para trás que a mergulhadora exerce sobre a água com o movimento das pernas. ∎

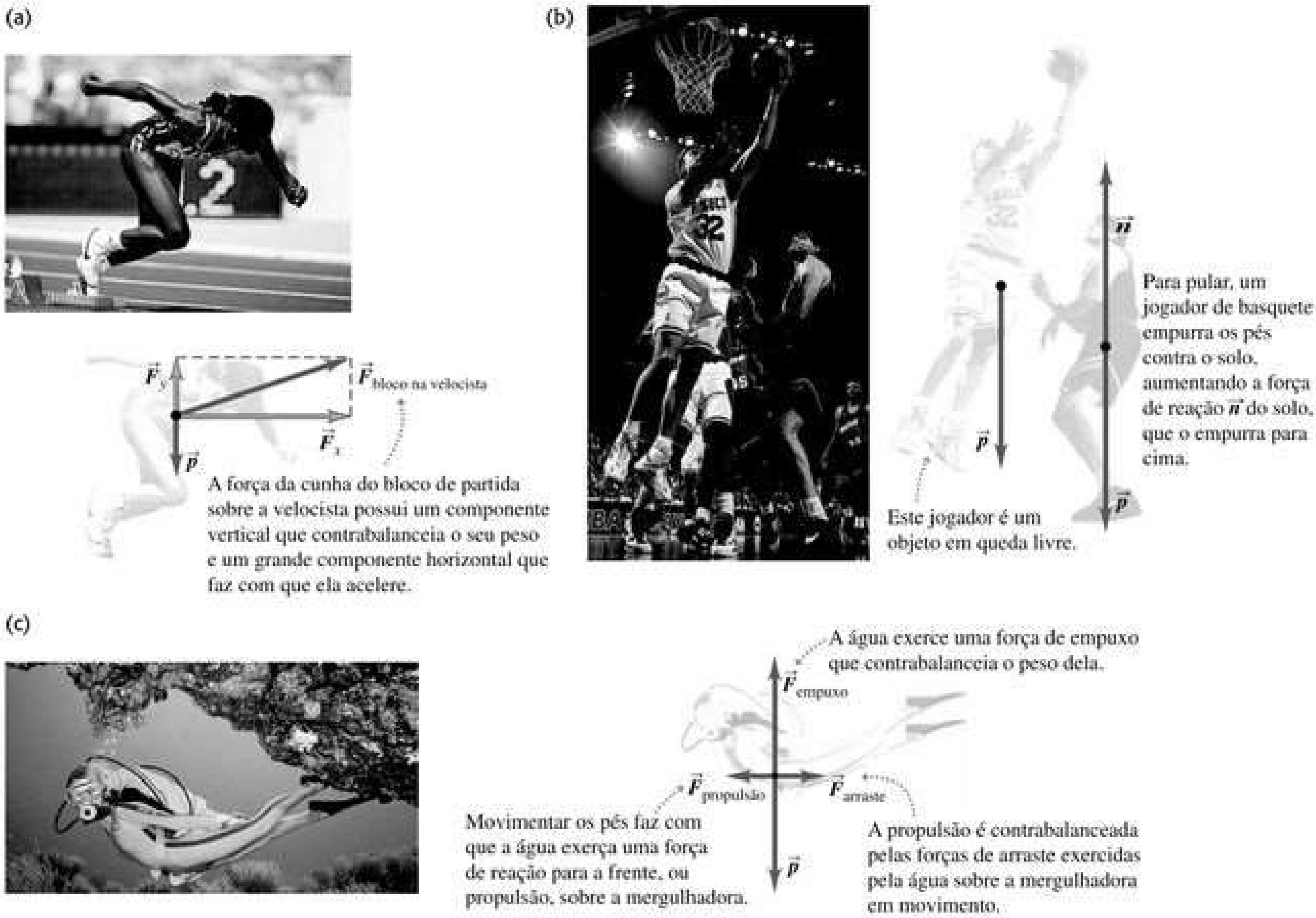
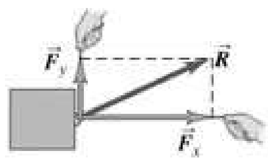


Figura 4.30 Exemplos de diagramas de corpo livre. Em cada caso, o diagrama de corpo livre mostra todas as forças externas que atuam sobre o objeto em questão.

Resumo

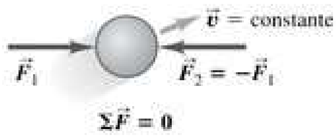
Força como grandeza vetorial: a força é a medida da interação entre dois corpos. É uma grandeza vetorial. Quando diversas forças atuam sobre um corpo, o efeito sobre seu movimento é o mesmo que o produzido pela ação de uma única força agindo sobre o corpo, dada pela soma vetorial (resultante) dessas forças. (Exemplo 4.1.)

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \cdots = \sum \vec{F} \tag{4.1}$$



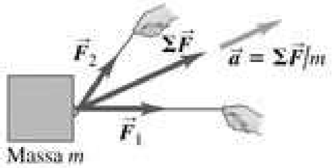
A força resultante sobre um corpo e a primeira lei de Newton: a primeira lei de Newton afirma que, quando a soma vetorial das forças que atuam sobre o corpo (a *força resultante*) é igual a zero, o corpo está em equilíbrio e possui aceleração nula. Quando o corpo está inicialmente em repouso, ele permanece em repouso; quando o corpo está inicialmente em movimento, ele continua em movimento com velocidade constante. Essa lei vale apenas em sistemas de referência inerciais. (exemplos 4.2 e 4.3.)

$$\sum \vec{F} = 0 \tag{4.3}$$



Massa, aceleração e a segunda lei de Newton: a propriedade inercial de um corpo é caracterizada pela sua *massa*. A aceleração de um corpo submetido à ação de um conjunto de forças é diretamente proporcional à soma vetorial das forças que atuam sobre o corpo (a *força resultante*) e inversamente proporcional à massa do corpo. Esta formulação é a segunda lei de Newton. Como na primeira lei, a segunda lei de Newton vale apenas em sistemas de referência inerciais. A unidade de força é definida em termos das unidades de massa e de aceleração. Em unidades SI, a unidade de força denomina-se newton (N), sendo igual a 1 kg · m/s^2. (exemplos 4.4 e 4.5.)

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$
$$\sum F_x = ma_x \quad (4.7)$$
$$\sum F_y = ma_y$$
$$\sum F_z = ma_z \quad (4.8)$$



Peso: o peso $\vec{p}$ de um corpo é a força de atração gravitacional exercida pela Terra sobre o corpo. O peso é uma grandeza vetorial. O módulo do peso de um corpo em um local específico é igual ao produto de sua massa m pelo módulo da aceleração da gravidade g nesse local. O peso de um corpo depende do local onde ele se encontra, porém a massa é sempre a mesma independentemente do local. (exemplos 4.6 e 4.7.)

$$p = mg \quad (4.9)$$

Terceira lei de Newton e os pares de ação e reação: a terceira lei de Newton afirma que quando dois corpos interagem, a força que o primeiro exerce sobre o segundo é exatamente igual e contrária à força que o segundo exerce sobre o primeiro. Essas forças são denominadas forças de ação e reação. Cada força de um par de ação e reação atua separadamente em somente um corpo; as forças de ação e reação nunca podem atuar sobre o mesmo corpo. (exemplos 4.8−4.11.)

$$\vec{F}_{A \text{ em } B} = -\vec{F}_{B \text{ em } A} \quad (4.11)$$

Principais termos

Resposta à Pergunta Inicial do Capítulo

De acordo com a terceira lei de Newton, a criança sentada (a quem chamaremos de Raul) empurra a criança em pé (a quem chamaremos de Stênio) com a mesma força que Stênio empurra Raul, mas no sentido oposto. Isso é verdadeiro, tanto no caso de Raul empurrar Stênio 'ativamente' (por exemplo, se Raul empurra Stênio com as mãos) quanto 'passivamente' (se as costas de Raul é que o empurram, como na foto que abre o capítulo). Os módulos das forças poderiam ser maiores no caso 'ativo' do que no 'passivo', mas em qualquer dos casos Raul empurra Stênio com a mesma força que Stênio empurra Raul.

Respostas às Perguntas dos Testes de Compreensão

4.1 **Resposta:** (iv) A força gravitacional sobre o engradado aponta diretamente de cima para baixo. Na Figura 4.6, o eixo x aponta para cima e para a direita, enquanto o eixo y aponta para cima e para a esquerda. Logo, a força gravitacional possui tanto o componente x quanto o componente y e ambos são negativos.

4.2 **Resposta: (i), (ii) e (iv)** Em (i), (ii) e (iv), o corpo não está em aceleração, por isso a força resultante sobre o corpo é igual a zero. [No item (iv), a caixa permanece estacionária sob o ponto de vista do sistema de referência inercial do solo quando o caminhão acelera para a frente, tal qual o patinador na Figura 4.11a.] No item (iii), a águia está se movendo em círculo; logo, está em aceleração e *não* em equilíbrio.

4.3 **Resposta: (iii), (i) e (iv) (empate), (ii)** A aceleração é igual à força resultante dividida pela massa. Logo, o módulo da aceleração em cada situação é:

(i) $a = (2{,}0\text{ N})/(2{,}0\text{ kg}) = 1{,}0\text{ m/s}^2$;
(ii) $a = (8{,}0\text{ N})/(2{,}0\text{ N}) = 4{,}0\text{ m/s}^2$;
(iii) $a = (2{,}0\text{ N})/(8{,}0\text{ kg}) = 0{,}25\text{ m/s}^2$;
(iv) $a = (8{,}0\text{ N})/(8{,}0\text{ kg}) = 1{,}0\text{ m/s}^2$.

4.4 O astronauta faria o dobro do esforço para caminhar, porque seu peso no planeta seria duas vezes maior que na Terra. Mas pegaria a bola deslocando-se horizontalmente com a mesma facilidade. A *massa* da bola é a mesma que na Terra, portanto a força horizontal a ser exercida pelo astronauta para parar a bola (ou seja, dar a ela a mesma aceleração) seria a mesma que na Terra.

4.5 Pela terceira lei de Newton, as duas forças possuem o mesmo módulo. Como o carro possui massa muito maior que a do mosquito, ele sofre somente uma aceleração mínima, imperceptível, em reação à força do impacto. Por outro lado, o mosquito, com sua massa minúscula, sofre uma aceleração catastroficamente grande.

4.6 **Resposta: (iv)** A força de flutuação é uma força *de baixo para cima* que a *água* exerce sobre a *mergulhadora*. Pela terceira lei de Newton, a outra metade do par de ação e reação é uma força *de cima para baixo* que a *mergulhadora* exerce sobre a *água* e possui o mesmo módulo que a força de flutuação. É verdade que o peso da mergulhadora também é orientado de cima para baixo e possui o mesmo módulo que a força de flutuação; entretanto, o peso atua sobre o mesmo corpo (a mergulhadora) que a força de flutuação e, portanto, essas forças não formam um par de ação e reação.

Questões para discussão

Q4.1 Pode um corpo permanecer em equilíbrio quando somente uma força atua sobre ele? Explique.

Q4.2 Uma bola lançada verticalmente de baixo para cima possui velocidade nula em seu ponto mais elevado. A bola está em equilíbrio nesse ponto? Por que sim ou por que não?

Q4.3 Um balão cheio de hélio fica suspenso no ar, nem subindo nem descendo. Ele está em equilíbrio? Quais as forças que atuam sobre ele?

Q4.4 Quando você voa de avião em uma noite com ar calmo, não tem a sensação de estar em movimento, embora o avião possa estar se deslocando a 800 km/h (500 mi/h). Como você explica isso?

Q4.5 Quando as duas extremidades de uma corda são puxadas com forças de mesmo módulo, mas sentidos contrários, por que a tensão na corda não é igual a zero?

Q4.6 Você amarra um tijolo na extremidade de uma corda e o faz girar em torno de você em um círculo horizontal. Descreva a trajetória do tijolo quando você larga repentinamente a corda.

Q4.7 Quando um carro pára repentinamente, os passageiros tendem a se mover para frente em relação aos seus assentos. Por quê? Quando um carro faz uma curva abrupta, os passageiros tendem a escorregar para um lado do carro. Por quê?

Q4.8 Algumas pessoas dizem que, quando um carro pára repentinamente, os passageiros são empurrados para a frente por uma 'força de inércia' (ou uma 'força de momento linear'). O que existe de errado nessa explicação?

Q4.9 Um passageiro no interior de um ônibus sem janelas e em movimento observa que uma bola que estava em repouso no meio do ônibus começa a se mover para a traseira do ônibus. Imagine dois modos diferentes de explicar o que ocorreu e descubra um método para decidir qual dos dois está correto.

Q4.10 Suponha que as unidades SI fundamentais sejam força, comprimento e tempo, em vez de massa, comprimento e tempo. Quais seriam as unidades de massa em termos dessas unidades fundamentais?

Q4.11 Na Grécia Antiga, alguns pensavam que o 'estado natural' de um objeto fosse o repouso, de modo que os objetos buscariam o seu estado natural ficando em repouso quando soltos. Explique por que essa visão pode muito bem parecer plausível no mundo atual.

Q4.12 Por que a Terra é considerada um sistema de referência inercial apenas aproximado?

Q4.13 A segunda lei de Newton é válida para um observador no interior de um veículo que está acelerando, parando ou fazendo uma curva? Explique.

Q4.14 Alguns estudantes dizem que a grandeza $m\vec{a}$ é a 'força da aceleração'. É correto dizer que essa grandeza é uma força? Em caso afirmativo, onde essa força é exercida? Em caso negativo, qual é a melhor descrição para essa grandeza?

Q4.15 A aceleração de um corpo em queda livre é medida no interior de um elevador que está subindo com velocidade constante de 9,8 m/s. Que resultado é obtido?

Q4.16 Você pode brincar de segurar uma bola lançada por outra pessoa em um ônibus que se move com velocidade constante em uma estrada retilínea, do mesmo modo como se o ônibus estivesse em repouso. Isso é possível quando o ônibus se move com velocidade constante em uma curva? Explique por que sim ou por que não.

Q4.17 Alguns estudantes afirmam que a força da gravidade sobre um objeto é 9,8 m/s^2. O que há de errado nessa noção?

Q4.18 A cabeça de um martelo começa a se soltar do cabo. Como você deve bater o cabo em um bloco de concreto para que a cabeça fique firme novamente? Por que isso funciona?

Q4.19 Por que um chute em uma rocha grande pode machucar mais o seu pé do que o chute em uma pedra pequena? A rocha grande *deve* sempre machucar mais? Explique.

Q4.20 'Não é a queda que machuca você; é a brusca parada embaixo.' Traduza isso usando a linguagem das leis de Newton do movimento.

Q4.21 Uma pessoa pode mergulhar na água pulando de uma altura de 10 m, sem se machucar, mas, quando ela pula de uma altura de 10 m e cai sobre um piso de concreto, sofre sérias lesões. Qual é a razão dessa diferença?

Q4.22 Por que, por motivo de segurança, um carro é projetado para sofrer esmagamento na frente e na traseira? Por que não para colisões laterais e capotagens?

Q4.23 Quando uma bala é disparada de uma arma, qual é a origem da força que acelera a bala?

Q4.24 Quando um peso grande é suspenso por um fio no limite de sua elasticidade, puxando-se o fio suavemente o peso pode ser levantado; porém, se você puxar bruscamente, o fio se rompe. Explique isso usando as leis de Newton do movimento.

Q4.25 Um engradado grande é suspenso pela extremidade de uma corda vertical. A tensão na corda é maior quando o engradado está em repouso ou quando ele se move de baixo para cima com velocidade constante? Quando o engradado se move na vertical, a tensão na corda é maior quando o engradado está sendo acelerado ou quando sua velocidade diminui? Explique cada caso usando as leis de Newton do movimento.

Q4.26 Qual pedra sente um puxão maior devido à gravidade da Terra, uma de 10 kg ou outra de 20 kg? Se você as deixar cair, por que a pedra de 20 kg não cai com o dobro da aceleração da pedra de 10 kg? Explique seu raciocínio.

Q4.27 Por que não é correto dizer que 1 kg é *igual* a 9,8 N?

Q4.28 Um cavalo puxa uma carroça. Uma vez que a carroça puxa o cavalo para trás com uma força igual e contrária à força exercida pelo cavalo sobre a carroça, por que a carroça não permanece em equilíbrio, independentemente da intensidade da força com a qual o cavalo puxa a carroça?

Q4.29 Verdadeiro ou falso: você exerce uma força de empurrar P sobre um objeto e ele empurra você de volta com uma força F. Se o objeto está se deslocando a uma velocidade constante, então F é igual a P, mas, se o objeto está em aceleração, então P deve ser maior que F.

Q4.30 Um caminhão grande e um automóvel compacto colidem frontalmente. Durante a colisão, o caminhão exerce uma força $\vec{F}_{T\ em\ C}$ sobre o automóvel, e o automóvel exerce uma força $\vec{F}_{C\ em\ T}$ sobre o caminhão. As duas forças possuem o mesmo módulo ou uma delas é maior do que a outra? Sua resposta depende do valor da velocidade de cada veículo antes da colisão? Por que sim ou por que não?

Q4.31 Quando um carro pára em uma estrada plana, qual força é responsável pela redução da velocidade? Quando o carro aumenta a velocidade escalar na mesma estrada, qual força é responsável pelo aumento da velocidade? Explique.

Q4.32 Um carro pequeno está puxando uma caminhonete que estava enguiçada, e eles se movem ao longo de uma estrada com a mesma velocidade e a mesma aceleração. Quando o carro está acelerando, a força que ele exerce sobre a caminhonete possui módulo maior, menor ou igual à força que a caminhonete exerce sobre o carro? A maior força resultante atua sobre o carro ou sobre a caminhonete, ou as duas forças resultantes possuem o mesmo módulo? Explique.

Q4.33 Em um cabo-de-guerra duas pessoas puxam as extremidades de uma corda em sentidos opostos. Pela terceira lei de Newton, a força que A exerce sobre B possui módulo igual ao da força que B exerce sobre A. Então, o que determina qual é o vencedor? (*Sugestão:* desenhe um diagrama do corpo livre para cada pessoa.)

Q4.34 Na Lua, $g = 1{,}62\ m/s^2$. Lá, se um tijolo de 2 kg caísse de uma altura de 2 m sobre o seu pé, causaria uma lesão maior, menor ou igual à que causaria se o mesmo fato acontecesse aqui na Terra? Explique. Se na Lua o tijolo fosse lançado horizontalmente e atingisse você com uma velocidade de 6 m/s, causaria uma lesão maior, menor ou igual do que a lesão causada nas mesmas circunstâncias na Terra? Explique. (Na Lua, suponha que você esteja dentro de uma cabina pressurizada e por isso não veste a roupa especial usada pelos astronautas.)

Q4.35 Um manual para aprendiz de piloto contém a seguinte passagem: 'Quando o avião voa em uma altitude constante, sem subir nem descer, a força de sustentação que atua de baixo para cima sobre suas asas é igual ao peso do avião. Quando o avião está subindo com aceleração constante, a força de sustentação que atua de baixo para cima sobre suas asas é maior do que o peso do avião; quando o avião está descendo com aceleração constante, a força de sustentação que atua de baixo para cima é menor do que o peso do avião'. Essas afirmações estão corretas? Explique.

Q4.36 Se suas mãos estão molhadas e não há nenhuma toalha disponível, você pode secar o excesso de umidade sacudindo-as. Por que esse movimento elimina a água?

Q4.37 Se você está agachado (como quando está olhando os livros na prateleira de baixo de uma estante) e se levanta repentinamente, você pode sentir uma tontura momentânea. Como as leis de Newton explicam isso?

Q4.38 Quando um carro sofre uma colisão traseira, os passageiros podem sentir como se fossem chicoteados. Use as leis de Newton para explicar as causas disso.

Q4.39 Em uma colisão frontal entre dois veículos, os passageiros que não estiverem com cintos de segurança afivelados poderão ser lançados através do pára-brisa. Use as leis de Newton para explicar as causas disso.

Q4.40 Em uma colisão frontal entre um carro compacto de 1000 kg e outro grande de 2500 kg, qual sofre a força maior? Explique. Qual sofre a maior aceleração? Explique por quê. Agora, explique por que os passageiros no carro menor têm mais chance de se ferir do que os do carro maior, mesmo que a carroceria de ambos os carros seja igualmente resistente.

Q4.41 Suponha que você está em um foguete sem janelas, viajando no espaço, distante de qualquer outro objeto. Sem olhar para fora do foguete ou fazer qualquer contato com o mundo externo, explique como você poderia determinar se o foguete está a) movendo-se para a frente a uma velocidade constante equivalente a 80% da velocidade da luz e b) acelerando para a frente.

Exercícios

Seção 4.1 Força e interações

4.1 Duas forças possuem o mesmo módulo F. Qual é o ângulo entre os dois vetores quando a soma vetorial possui o módulo igual a a) $2F$? b) $\sqrt{2}F$? c) Zero? Faça um desenho dos três vetores em cada caso.

4.2 Em vez de usar os eixos Ox e Oy da Figura 4.8 para analisar a situação do Exemplo 4.1, use um sistema de eixos girados de 37,0° no sentido anti-horário, de modo que o eixo Ox seja paralelo à força de 250 N. a) Para esses eixos ache os componentes x e y da força resultante que atua sobre a partícula. b) Partindo dos componentes calculados em (a), calcule o módulo, a direção e o sentido da força resultante. Compare seus resultados com o Exemplo 4.1.

4.3 Um trabalhador de um armazém empurra uma caixa ao longo de um piso como indicado na Figura 4.31, aplicando uma força de 10 N de cima para baixo, formando um ângulo de 45° abaixo da horizontal. Ache os componentes horizontais e verticais da força.

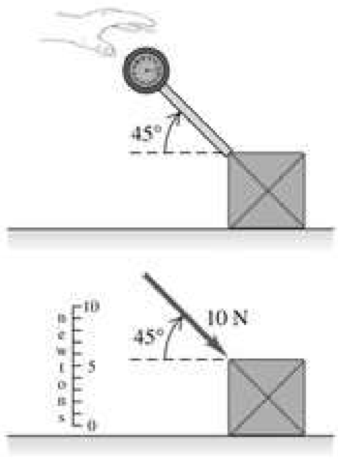


Figura 4.31 Exercício 4.3.

4.4 Um homem está puxando uma mala para cima ao longo da rampa de carga de um caminhão de mudanças. A rampa possui um ângulo de 20,0° e o homem exerce uma força $\vec{F}$ para cima cuja direção forma um ângulo de 30,0° com a rampa (Figura 4.32). a) Qual deve ser o módulo da força $\vec{F}$ necessária para que o componente

Figura 4.32 Exercício 4.4.

F_x paralelo à rampa possua módulo igual a 60,0 N? b) Qual deve ser o módulo do componente F_y nesse caso?

4.5 Dois cachorros puxam horizontalmente cordas amarradas a um poste; o ângulo entre as cordas é igual a 60,0°. Se o cachorro *A* exerce uma força de 270 N e o cachorro *B* exerce uma força de 300 N, ache o módulo da força resultante e o ângulo que ela faz com a corda do cachorro *A*.

4.6 Duas forças, $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, atuam sobre um ponto. O módulo de $\vec{F}_1$ é igual a 9,0 N, e sua direção forma um ângulo de 60,0° acima do eixo Ox no segundo quadrante. O módulo de $\vec{F}_2$ é igual a 6,0 N, e sua direção forma um ângulo de 53,1° abaixo do eixo Ox no terceiro quadrante. a) Quais são os componentes x e y da força resultante? b) Qual o módulo da força resultante?

Seção 4.3 Segunda lei de Newton

4.7 Se uma força resultante horizontal de 132 N é aplicada a uma pessoa com massa de 60 kg em repouso na beira de uma piscina, qual é a aceleração produzida?

4.8 Qual o módulo da força necessária para imprimir uma aceleração de 1,40 m/s² em uma geladeira com massa de 135 kg?

4.9 Uma caixa está em repouso sobre um lago congelado, que é uma superfície horizontal sem atrito. Se um pescador aplica uma força horizontal de módulo 48,0 N sobre a caixa, produzindo uma aceleração de 3,0 m/s², qual é a massa da caixa?

4.10 Um portuário aplica uma força horizontal constante de 80,0 N a um bloco de gelo sobre uma superfície horizontal lisa. A força de atrito é desprezível. O bloco parte do repouso e se move 11,0 m em 5,0 s. a) Qual é a massa do bloco de gelo? b) Se o portuário parar de empurrar o bloco depois de 5,0 s, qual será a distância percorrida pelo bloco nos 5,0 s posteriores?

4.11 Um disco de hóquei com massa de 0,160 kg está em repouso na origem ($x = 0$) em uma superfície horizontal sem atrito da pista. No instante $t = 0$, um jogador aplica sobre o disco uma força de 0,250 N paralela ao eixo Ox; ele continua a aplicar a força até $t = 2,0$ s. a) Qual é a posição e a velocidade do disco no instante $t = 2,0$ s? b) Se a mesma força for aplicada novamente no instante $t = 5,0$ s, qual será a posição e a velocidade do disco no instante $t = 7,0$ s?

4.12 Um engradado com massa de 32,5 kg, inicialmente em repouso sobre o piso de um armazém, sofre uma força resultante horizontal de 140 N. a) Qual é a aceleração produzida? b) Qual é a distância percorrida pelo engradado em 10,0 s? c) Qual é a velocidade escalar ao final de 10,0 s?

4.13 Uma carreta de brinquedo pesando 4,50 kg está em aceleração por uma linha reta (o eixo x). O gráfico na Figura 4.33 mostra essa aceleração em função do tempo. a) Ache a força resultante máxima que atua sobre esse objeto. Quando essa força máxima ocorre? b) Em que instantes a força resultante sobre o brinquedo é constante? c) Quando a força resultante é igual a zero?

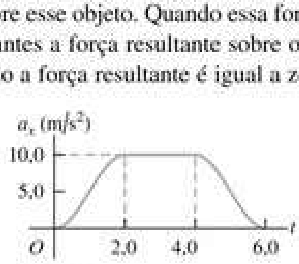


Figura 4.33 Exercício 4.13.

4.14 Um gato de 2,75 kg move-se em linha reta (o eixo x). A Figura 4.34 mostra um gráfico do componente x da velocidade desse gato em função do tempo. a) Ache a força resultante máxima que atua sobre esse gato. a) Quando essa força ocorre? b) Quando a força resultante sobre o gato é igual a zero? c) Qual é a força resultante no instante 8,5 s?

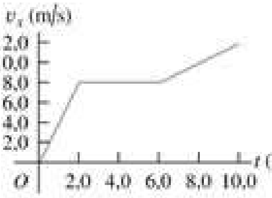


Figura 4.34 Exercício 4.14.

4.15 Um pequeno foguete de 8,0 kg queima combustível que exerce uma força de baixo para cima, que varia com o tempo, sobre o foguete. Essa força obedece à equação $F = A + Bt^2$. Medidas mostram que no instante $t = 0$ a força é de 100,0 N, e no final dos primeiros 2,0 s, 150,0 N. a) Ache as constantes *A* e *B*, incluindo suas unidades SI. b) Ache a força *resultante* sobre esse foguete e sua aceleração i) no instante após o combustível se inflamar e ii) 3,0 s após a ignição. c) Suponha que você estivesse usando esse foguete no espaço, distante de toda gravidade. Qual seria sua aceleração 3,0 s após a ignição?

4.16 Um elétron (massa = $9,11 \times 10^{-31}$ kg) deixa a extremidade de um tubo luminoso de TV com velocidade inicial zero e se desloca em linha reta até a grade de aceleração, que está a uma distância de 1,80 cm. Ele a atinge a $3,0 \times 10^6$ m/s. Se a força que o acelera for constante, calcule a) a aceleração; b) o tempo para atingir a grade; c) a força resultante, em newtons. (A força gravitacional sobre o elétron é desprezível.)

Seção 4.4 Massa e peso

4.17 O super-homem lança uma rocha de 2400 N sobre seu adversário. Qual é a força horizontal que o super-homem deve aplicar sobre a rocha para que ela se desloque com uma aceleração horizontal igual a 12,0 m/s²?

4.18 Uma bola de boliche pesa 71,2 N. O jogador aplica sobre ela uma força horizontal de 160 N. Qual o módulo da aceleração horizontal da bola?

4.19 Na superfície de Io, uma das luas de Júpiter, a aceleração da gravidade é $g = 1,81$ m/s². Uma melancia pesa 44,0 N na superfície da Terra. a) Qual sua massa na superfície da Terra? b) Qual sua massa e peso na superfície de Io?

4.20 A mochila de uma astronauta pesa 17,5 N quando ela está na superfície terrestre, mas somente 3,24 N na superfície de um asteróide. a) Qual é a aceleração da gravidade nesse asteróide? b) Qual é a massa da mochila no asteróide?

Seção 4.5 Terceira lei de Newton

4.21 Uma velocista de competição mundial que pesa 55 kg pode se acelerar a partir do bloco de partida com uma aceleração aproximadamente horizontal cujo módulo é igual a 15 m/s². Que força horizontal deve a velocista exercer sobre o bloco de partida para produzir essa aceleração? Qual é o corpo que exerce a força que impulsiona a velocista: o bloco ou a própria velocista?

4.22 Imagine que você esteja sustentando um livro de 4 N em repouso sobre a palma da sua mão. Complete as seguintes sentenças: a) Uma força de cima para baixo de módulo igual a 4 N é exercida sobre o livro pela __________. b) Uma força de baixo para cima de módulo __________ é exercida sobre __________ pela palma da sua mão. c) É a força de baixo para cima do item

(b) a reação da força de cima para baixo do item (a)? d) A reação da força do item (a) é a força de módulo __________ exercida sobre __________ pelo __________. Seu sentido é __________. e) A reação da força do item (b) é a força de módulo __________ exercida sobre __________ pelo __________. f) As forças dos itens (a) e (b) são iguais e opostas em virtude da __________ lei de Newton. g) As forças dos itens (b) e (e) são iguais e opostas em virtude da __________ lei de Newton. Suponha agora que você exerça sobre o livro uma força de baixo para cima de módulo igual a 5 N. h) O livro permanece em equilíbrio? i) É a força exercida sobre o livro pela sua mão igual e oposta à força exercida sobre o livro pela Terra? j) É a força exercida sobre o livro pela Terra igual e oposta à força exercida sobre a Terra pelo livro? k) É a força exercida sobre o livro pela sua mão igual e oposta à força exercida sobre sua mão pelo livro? Finalmente, suponha que você retire subitamente sua mão enquanto o livro se move para cima. l) Quantas forças atuam agora sobre o livro? m) O livro está em equilíbrio?

4.23 Uma garrafa é empurrada sobre uma mesa e escorrega para fora da extremidade da mesa. *Não* despreze a resistência do ar. a) Quais forças atuam sobre a garrafa enquanto ela cai da mesa até o chão? b) Quais são as reações dessas forças; ou seja, sobre quais corpos e por quais corpos as reações são exercidas?

4.24 O piso de um elevador exerce uma força normal de 620 N de baixo para cima sobre um passageiro que pesa 650 N. Quais são as reações dessas duas forças? O passageiro está sendo acelerado? Em caso afirmativo, determine o módulo, a direção e o sentido da aceleração.

4.25 Uma estudante com massa de 45 kg pula de um trampolim elevado. Considerando a massa da Terra como $6{,}0 \times 10^{24}$ kg, qual é a aceleração da Terra no sentido da estudante quando ela se acelera no sentido da Terra com 9,8 m/s^2? Suponha que a força resultante sobre a Terra seja a força gravitacional que ela exerce sobre a Terra.

Seção 4.6 Exemplos de diagramas do corpo livre

4.26 Um atleta joga uma bola de massa m diretamente de baixo para cima, com resistência do ar desprezível. Desenhe um diagrama do corpo livre para essa bola enquanto ela está livre da mão do atleta e a) deslocando-se de baixo para cima; b) no seu ponto mais alto; c) deslocando-se de cima para baixo. d) Repita os itens (a), (b) e (c) considerando que o atleta joga a bola formando um ângulo de 60° acima da horizontal, em vez de diretamente de baixo para cima.

4.27 Dois engradados, A e B, estão em repouso, lado a lado, sobre uma superfície horizontal livre de atrito. Eles possuem massa m_A e m_B. Uma força horizontal $\vec{F}$ é aplicada sobre o engradado A, e os dois engradados se movem para a direita. a) Desenhe diagramas do corpo livre claramente designados para o engradado A e para o engradado B. Indique quais pares de forças, se houver, são os pares de ação e reação da terceira lei. b) Se o módulo da força $\vec{F}$ for menor que o peso total dos dois engradados, isso fará com que eles se movam? Explique.

4.28 Uma pessoa puxa horizontalmente o bloco B da Figura 4.35, fazendo com que ambos os blocos movam-se juntos, como uma unidade. Para esse sistema em movimento, faça um diagrama do corpo livre claramente designado para o bloco A, considerando que a) a mesa é livre de atrito e b) há atrito entre o bloco B e a mesa e a força de puxar é igual à força de atrito sobre o bloco B, devido à mesa.

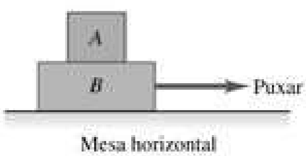


Figura 4.35 Exercício 4.28

4.29 Uma bola está pendurada por um fio longo amarrado ao teto do vagão de um trem que viaja de oeste para leste sobre trilhos horizontais. Um observador no interior do vagão vê a bola suspensa, sem movimento. Faça um diagrama do corpo livre para a bola, considerando que a) o trem possui velocidade uniforme e b) o trem está aumentando a velocidade de forma uniforme. A força resultante sobre a bola é igual a zero em ambos os casos? Explique.

4.30 Uma caixa grande contendo o seu novo computador está na carroceria da sua caminhonete. Você está parado em um semáforo. A luz verde se acende e você pisa no acelerador, fazendo a caminhonete acelerar. Para sua aflição, a caixa começa a deslizar em direção à traseira do veículo. Desenhe diagramas do corpo livre separados para a caminhonete e para a caixa. Indique os pares de forças, se houver, que sejam os pares de ação e reação da terceira lei. (*Não* despreze o atrito no leito da carroceria.)

4.31 Uma cadeira com massa de 12,0 kg está sobre um piso horizontal, que não está livre de atrito. Você empurra a cadeira com uma força $F = 40{,}0$ N, que forma um ângulo de 37,0° abaixo da horizontal, e a cadeira desliza ao longo do piso. a) Faça um diagrama do corpo livre para a cadeira. b) Use seu diagrama e as leis de Newton para calcular a força normal que o piso exerce sobre a cadeira.

4.32 Um esquiador com massa de 65,0 kg é puxado para cima em uma encosta coberta de neve, a uma velocidade escalar constante, pelo cabo de um reboque que está paralelo ao solo. O solo tem inclinação de baixo para cima, formando um ângulo de 26,0° acima da horizontal, e o atrito é desprezível. a) Faça um diagrama do corpo livre para o esquiador. b) Calcule a tensão no cabo do reboque.

4.33 Um caminhão está puxando um carro em uma estrada horizontal, usando uma corda horizontal. O carro está em ponto morto, de modo que podemos assumir que não há atrito significativo entre os pneus e a estrada. Considerando que o caminhão aumenta a velocidade para níveis de estrada, desenhe um diagrama do corpo livre para a) o carro e b) o caminhão. c) Qual força acelera esse sistema para a frente? Explique como essa força se origina.

Problemas

4.34 Uma bala de um rifle 22, deslocando-se a 350 m/s, atinge o tronco de uma árvore grande, no qual ela penetra até uma profundidade de 0,130 m. A massa da bala é de 1,80 g. Suponha uma força retardadora constante. a) Qual é o tempo necessário para a bala parar? b) Qual é a força, em newtons, que o tronco da árvore exerce sobre a bala?

4.35 Dois cavalos puxam horizontalmente cordas amarradas a um tronco de árvore. As duas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ que eles exercem sobre o tronco são tais que a força resultante $\vec{R}$ possui módulo igual ao de $\vec{F}_1$ e faz um ângulo de 90° com $\vec{F}_1$. Seja $\vec{F}_1 = 1300$ N e $\vec{R} = 1300$ N. Determine o módulo, a direção e o sentido de $\vec{F}_2$ (em relação a $\vec{F}_1$).

4.36 Você acabou de pousar no Planeta X e apanha uma bola de 100 g. Você a deixa cair, a partir do repouso, de uma altura de 10,0 m e cronometra que ela leva 2,2 s para atingir o solo.

Ignore qualquer força sobre a bola exercida pela atmosfera do planeta. Quanto a bola de 100 g pesa na superfície do Planeta X?

4.37 Dois adultos e uma criança querem empurrar uma caixa apoiada sobre rodas na direção do ponto marcado com x na Figura 4.36. Os dois adultos empurram com forças horizontais $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ como mostra a figura. a) Ache o módulo, a direção e o sentido da *menor* força que a criança deve exercer. Ignore os efeitos do atrito. b) Se a criança exercer a força mínima determinada no item (a), a caixa acelera a 2,0 m/s^2 na direção $+x$. Qual é o peso da caixa?

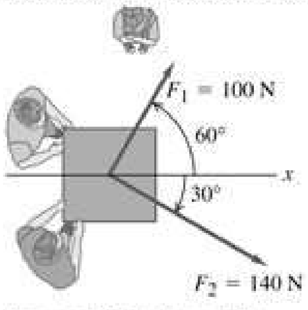


Figura 4.36 Problema 4.37.

4.38 Os motores de um navio-tanque enguiçaram e o vento está levando o navio diretamente para um recife, a uma velocidade escalar constante de 1,5 m/s (Figura 4.37). Quando o navio está a 500 m do recife, o vento cessa e os motores voltam a funcionar. O leme está emperrado, e a única alternativa é tentar acelerar diretamente para trás, para se afastar do recife. A massa do navio e da carga é de $3{,}6 \times 10^7$ kg, e os motores produzem uma força resultante horizontal de $8{,}0 \times 10^4$ N sobre o navio. Ele atingirá o recife? Se sim, o petróleo estará seguro? O casco resiste ao impacto de uma velocidade escalar de até 0,2 m/s. Ignore a força retardadora da água sobre o casco do navio-tanque.

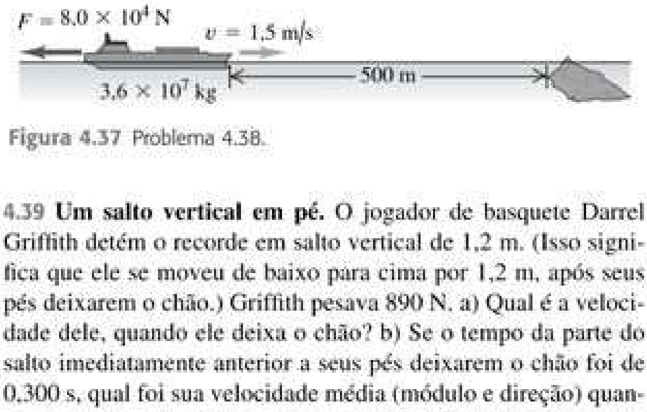


Figura 4.37 Problema 4.38.

4.39 **Um salto vertical em pé.** O jogador de basquete Darrel Griffith detém o recorde em salto vertical de 1,2 m. (Isso significa que ele se moveu de baixo para cima por 1,2 m, após seus pés deixarem o chão.) Griffith pesava 890 N. a) Qual é a velocidade dele, quando ele deixa o chão? b) Se o tempo da parte do salto imediatamente anterior a seus pés deixarem o chão foi de 0,300 s, qual foi sua velocidade média (módulo e direção) quando ele empurrava o corpo contra o chão? c) Desenhe o diagrama do corpo livre (veja a Seção 4.6). Em termos das forças no diagrama, qual é a força resultante sobre ele? Use as leis de Newton e os resultados da parte b) para calcular a força média que ele aplicou sobre o solo.

4.40 Um anúncio publicitário afirma que um dado automóvel pode 'parar em questão de centavos'. Qual é a força resultante realmente necessária para parar um automóvel de 850 kg, com deslocamento inicial a 45,0 km/h, em uma distância igual ao diâmetro de uma moeda, calculada em 1,8 cm?

4.41 Um balde com água pesando 4,80 kg é acelerado de baixo para cima por uma corda de massa desprezível cuja tensão de ruptura é igual a 75,0 N. a) Desenhe um diagrama de força do corpo livre para o balde. Em termos das forças sobre o seu diagrama, qual é a força resultante sobre o balde? b) Aplique a segunda lei de Newton para o balde e calcule a aceleração máxima de baixo para cima que o balde pode ter sem que a corda se rompa.

4.42 Uma pára-quedista confia na resistência do ar (principalmente no seu pára-quedas) para diminuir sua velocidade durante a queda. Sabendo que sua massa, incluindo a do pára-quedas, é igual a 55,0 kg e que a resistência do ar exerce uma força de baixo para cima de 620 N sobre ela e seu pára-quedas, a) qual é o peso da pára-quedista? b) Desenhe um diagrama do corpo livre para a pára-quedista (veja Seção 4.6). Use esse diagrama para calcular a força resultante sobre a pára-quedista. A força resultante é orientada de baixo para cima ou de cima para baixo? c) Qual é a aceleração (módulo e direção) da pára-quedista?

4.43 Duas caixas, uma de massa de 4,0 kg e outra de 6,0 kg, estão em repouso sobre a superfície sem atrito de um lago congelado, ligadas por uma corda leve (Figura 4.38). Uma mulher usando um tênis de solado áspero (de modo que ela possa exercer tração sobre o solo) puxa horizontalmente a caixa de 6,0 kg com uma força F que produz uma aceleração de 2,50 m/s^2. a) Qual é a aceleração da caixa de 4,0 kg? b) Desenhe um diagrama do corpo livre para a caixa de 4,0 kg. Use esse diagrama e a segunda lei de Newton para achar a tensão T na corda que conecta as duas caixas. c) Desenhe um diagrama do corpo livre para a caixa de 6,0 kg. Qual é a direção da força resultante sobre a caixa de 6,0 kg? Qual tem o maior módulo, a força T ou a força F? d) Use a parte c) e a segunda lei de Newton para calcular o módulo da força F.

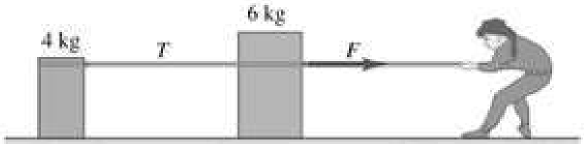


Figura 4.38 Problema 4.43.

4.44 Uma astronauta está ligada a uma nave espacial por um cabo forte. A astronauta com sua roupa e equipamentos possui massa total de 105 kg, enquanto a massa do cabo é desprezível. A massa da espaçonave é igual a $9{,}05 \times 10^4$ kg. A espaçonave está longe de qualquer corpo celeste, de modo que as forças gravitacionais externas sobre ela e sobre a astronauta são desprezíveis. Supomos também que a astronauta e a espaçonave estejam em repouso inicialmente em um sistema de referência inercial. A astronauta puxa o cabo com uma força de 80,0 N. a) Qual é a força que o cabo exerce sobre a astronauta? b) Visto que $\sum \vec{F} = m\vec{a}$, como pode um 'cabo sem massa' ($m = 0$) exercer uma força? c) Qual é a aceleração da astronauta? d) Qual é a força que o cabo exerce sobre a espaçonave? e) Qual é a aceleração da espaçonave?

4.45 Para estudar o dano que a colisão com grandes pássaros pode causar a um avião, você projeta uma arma de teste, que vai acelerar objetos do tamanho de uma galinha, de modo que seu deslocamento ao longo do cano da arma seja dado por $x = (9{,}0 \times 10^3 \text{ m/s}^2)t^2 - (8{,}0 \times 10^4 \text{ m/s}^3)t^3$. O objeto deixa o fim do cano no instante $t = 0{,}025$ s. a) Qual deve ser o comprimento do cano da arma? b) Qual será a velocidade escalar dos objetos quando deixam o final do cano? c) Qual força resultante deve ser exercida sobre um objeto de 1,50 kg a i) $t = 0$ e ii) $t = 0{,}025$ s?

4.46 Uma nave espacial desce verticalmente próximo à superfície do Planeta X. Uma propulsão de baixo para cima de 25,0 kN dos seus motores reduz a velocidade da nave a uma taxa de 1,20 m/s^2, mas ela aumenta a velocidade a uma taxa de 0,80 m/s^2 com uma força propulsora de baixo para cima de 10,0 kN. a) Em cada caso, qual é a direção da aceleração da nave? b) Desenhe um diagrama do corpo livre para a nave. Em cada caso, de aumento ou redução da velocidade, qual é a direção da força resultante sobre a nave? c) Aplique a segunda lei de Newton para cada caso, aumento ou redução de velocidade, e use isso para achar o peso da nave próximo à superfície do Planeta X.

4.47 Um instrumento de 6,50 kg está pendurado por um cabo vertical no interior de uma espaçonave que está sendo lançada da superfície terrestre. Essa nave parte do repouso e alcança a altitude de 276 m em 15,0 s com aceleração constante. a) Desenhe um diagrama do corpo livre para o instrumento nesse período de tempo. Indique qual força *é* maior. b) Ache a força que o cabo exerce sobre o instrumento.

4.48 Suponha que o foguete no Problema 4.47 está se aproximando para uma aterrissagem vertical em vez de estar sendo lançado. O capitão ajusta a propulsão do motor de modo que o módulo da aceleração do foguete seja o mesmo que era durante o lançamento. Repita as partes (a) e (b).

4.49 Uma ginasta de massa m escala uma corda vertical que está presa ao teto. Ignore o peso da corda. Desenhe um diagrama do corpo livre para a ginasta. Calcule a tensão na corda, considerando que a ginasta a) escala a uma taxa constante; b) dependura-se estática na corda; c) sobe a corda com aceleração de módulo $|\vec{a}|$; d) escorrega pela corda com aceleração de cima para baixo de módulo $|\vec{a}|$.

4.50 Um elevador carregado possui massa total de 2200 kg. Os cabos muito desgastados podem suportar uma tensão máxima de 28000 N. a) Faça um diagrama de força do corpo livre para o elevador. Em termos das forças que atuam no seu diagrama, qual é a força resultante sobre o elevador? Aplique a segunda lei de Newton para o elevador e ache a aceleração máxima de baixo para cima para o elevador, sem que os cabos se rompam. b) Qual seria a resposta para o item a), se o elevador estivesse na Lua, onde $g = 1{,}62\ \text{m/s}^2$?

4.51 Pulando para o solo. Um homem de 75,0 kg pula de uma plataforma de 3,10 m de altura acima do solo. Ele mantém as pernas esticadas à medida que cai, mas no momento em que os pés tocam o solo, os joelhos começam a se dobrar, e, considerando-o uma partícula, ele se move 0,60 m antes de parar. a) Qual é sua velocidade no momento em que os pés tocam o solo? b) Qual é sua aceleração (módulo e direção) quando ele diminui de velocidade, supondo uma aceleração constante? c) Desenhe o diagrama do corpo livre para ele (Seção 4.6). Em termos das forças que atuam no diagrama, qual é a força resultante sobre ele? Use as leis de Newton e os resultados do item (b) para calcular a força média que os pés dele exercem sobre o solo enquanto ele diminui de velocidade. Expresse essa força em newtons e também como um múltiplo do peso dele.

4.52 A cabeça de um martelo de 4,9 N, que se desloca de cima para baixo com velocidade de 3,2 m/s, pára, fazendo um prego penetrar 0,45 cm em uma placa de pinho. Além de seu peso, existe uma força de 15 N aplicada de cima para baixo sobre o martelo por uma pessoa que o está usando. Suponha que a aceleração da cabeça do martelo seja constante durante o contato com o prego. a) Faça um diagrama do corpo livre para a cabeça do martelo. Identifique a força de reação a cada uma das forças incluídas no diagrama. b) Determine a força $\vec{F}$ de cima para baixo exercida pela cabeça do martelo durante o contato com o prego. c) Suponha que o prego esteja em contato com madeira dura e que a cabeça do martelo só se desloque 0,12 cm até parar. A força aplicada sobre o martelo é a mesma do item (b). Qual será então a força $\vec{F}$ de cima para baixo exercida pela cabeça do martelo durante o contato com o prego?

4.53 Um cabo uniforme de peso p fica pendurado verticalmente de cima para baixo, equilibrado por uma força de módulo p de baixo para cima aplicada em sua extremidade superior. Qual é a tensão no cabo a) em sua extremidade superior? b) Em sua extremidade inferior? c) Em seu ponto médio? Sua resposta para cada parte deve incluir um diagrama do corpo livre. (*Sugestão:* Para cada questão, isole a seção ou o ponto do cabo que você analisará.) d) Faça um gráfico da tensão na corda *versus* a distância a partir da extremidade superior.

4.54 Os dois blocos indicados na Figura 4.39 estão ligados por uma corda uniforme e pesada, com massa de 4,0 kg. Uma força de 200 N é aplicada de baixo para cima conforme indicado. a) Desenhe três diagramas do corpo livre, um para o bloco de 6,0 kg, um para a corda de 4,0 kg e outro para o bloco de 5,0 kg. Para cada força, indique qual é o corpo que exerce a referida força. b) Qual é a aceleração do sistema? c) Qual é a tensão no topo da pesada corda? d) Qual é a tensão no meio da corda?

Figura 4.39 Problema 4.54.

4.55 Um atleta com massa de 90,0 kg está praticando exercícios de levantamento de peso. Saindo da posição de repouso, ele levanta, com aceleração constante, um haltere que pesa 490 N. Ele levanta o haltere a uma distância de 0,60 m em 1,6 s. a) Faça um diagrama de força do corpo livre para o haltere e outro para o atleta. b) Use os diagramas do item (a) e as leis de Newton para achar a força total que os pés dele exercem sobre o solo enquanto ele ergue o haltere.

4.56 Um balão de ar quente consiste de um cesto, um passageiro e alguma carga. Considere a massa total como M. Embora haja uma força de levantamento de baixo para cima que atua sobre o balão, este inicialmente está acelerando no sentido de cima para baixo a uma taxa de $g/3$. a) Desenhe um diagrama do corpo livre para o balão descendente. b) Encontre a força de levantamento de baixo para cima em termos do peso inicial total Mg. c) O passageiro observa que está se dirigindo diretamente para uma cachoeira e decide que precisa subir. Qual fração do peso total ele deve soltar do cesto para que o balão acelere *de baixo para cima* a uma taxa de $g/2$? Suponha que a força de levantamento de baixo para cima permanece a mesma.

4.57 Um estudante tenta erguer uma corrente que consiste de três elos idênticos. Cada elo possui massa de 300 g. A corrente de três peças é conectada a um fio e depois suspensa verticalmente, com o estudante segurando a extremidade superior do fio e puxando de baixo para cima. Em função da força de puxar do estudante, uma força de baixo para cima de 12 N é aplicada sobre a corrente pelo fio. a) Desenhe um diagrama do corpo livre para *cada* elo na corrente e também para a corrente toda considerada como um corpo único. b) Use os resultados do item (a) e as leis de Newton para determinar i) a aceleração da corrente e ii) a força exercida pelo elo superior sobre o elo do meio.

4.58 A posição de um helicóptero de treinamento de $2{,}75 \times 10^5$ N é dada por

$$\vec{r} = (0{,}020 \text{ m/s}^3)t^3\hat{\imath} + (2{,}2 \text{ m/s})t\hat{\jmath} - (0{,}060 \text{ m/s}^2)t^2\hat{k}.$$

Ache a força resultante sobre o helicóptero para $t = 5{,}0$ s.

4.59 Um objeto com massa m move-se ao longo do eixo Ox. Sua posição em função do tempo é dada por $x(t) = At - Bt^3$, onde A e B são constantes. Calcule a força resultante sobre o objeto em função do tempo.

4.60 Um objeto de massa m inicialmente em repouso é submetido a uma força dada por $\vec{F} = k_1\hat{\imath} + k_2t^3\hat{\jmath}$, onde k_1 e k_2 são constantes. Determine a velocidade $\vec{v}(t)$ do objeto em função do tempo.

Problemas desafiadores

4.61 Conhecendo-se $F(t)$, a força em função do tempo, para um movimento retilíneo, a segunda lei de Newton fornece $a(t)$, a aceleração em função do tempo. Podemos então integrar $a(t)$ para obter $v(t)$ e $x(t)$. Contudo, suponha que em vez disso você conheça $F(v)$. a) A força resultante sobre um corpo que se move ao longo do eixo Ox é igual a $-Cv^2$. Use a segunda lei de Newton escrita como $\sum F = m\,dv/dt$ e faça duas integrações para mostrar que $x - x_0 = (m/C)\ln(v_0/v)$. b) Mostre que a segunda lei de Newton pode ser escrita como $\sum F = mv\,dv/dx$. Deduza a mesma expressão obtida na parte (a) usando essa forma da segunda lei de Newton fazendo uma integração.

4.62 Um objeto de massa m está inicialmente em repouso na origem. No instante $t = 0$, aplica-se uma nova força $\vec{F}(t)$ cujos componentes são

$$F_x(t) = k_1 + k_2y \qquad F_y(t) = k_3t$$

onde k_1, k_2 e k_3 são constantes. Determine em função do tempo o vetor posição $\vec{r}(t)$ e o vetor velocidade $\vec{v}(t)$.