

# FORÇA E MOVIMENTO - II

# 6

## 6-1

### O QUE É FÍSICA?

Neste capítulo, concentraremos nossa atenção na física de três tipos comuns de força: a força de atrito, a força de arrasto e a força centrípeta. Ao preparar um carro para as 500 milhas de Indianápolis, um mecânico deve levar em conta os três tipos de força. As forças de atrito que agem sobre os pneus são cruciais para a aceleração do carro ao deixar o boxe e ao sair das curvas (se o carro encontrar uma mancha de óleo, os pneus perdem aderência e o carro pode sair da pista). As forças de arrasto produzidas pelas correntes de ar devem ser minimizadas, caso contrário o carro consumirá muito combustível e terá que ser reabastecido prematuramente (uma parada adicional de apenas 14 s pode custar a corrida a um piloto). As forças centrípetas são fundamentais nas curvas (se não houver força centrípeta suficiente, o carro não conseguirá fazer a curva). Vamos iniciar nossa discussão com as forças de atrito.

### 6-2 Atrito

As forças de atrito são inevitáveis na vida diária. Se não fôssemos capazes de vencê-las, fariam parar todos os objetos que estivessem se movendo e todos os eixos que estivessem girando. Cerca de 20% da gasolina consumida por um automóvel são usados para compensar o atrito das peças do motor e da transmissão. Por outro lado, se não houvesse atrito, não poderíamos fazer o automóvel ir a lugar algum nem poderíamos caminhar ou andar de bicicleta. Não poderíamos segurar um lápis, e, mesmo que pudéssemos, não conseguíramos escrever. Pregos e parafusos seriam inúteis, os tecidos se desmanchariam e os nós se desatariam.

Neste capítulo tratamos de forças de atrito que existem entre duas superfícies sólidas estacionárias ou que se movem uma em relação à outra em baixa velocidade. Considere três experimentos imaginários simples:

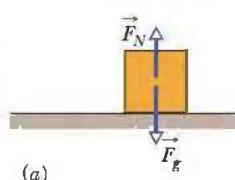
1. Dê um empurrão momentâneo em um livro, fazendo-o deslizar sobre uma mesa. Com o tempo, a velocidade do livro diminui até se anular. Isso significa que o livro sofreu uma aceleração paralela à superfície da mesa, com o sentido oposto ao da velocidade. De acordo com a segunda lei de Newton, deve ter existido uma força, paralela à superfície da mesa, com o sentido oposto ao da velocidade do livro. Essa força é uma força de atrito.
2. Empurre o livro horizontalmente de modo a fazê-lo se deslocar com velocidade constante ao longo da mesa. A força que você está exercendo pode ser a única força horizontal que age sobre o livro? Não, porque, nesse caso, o livro sofreria uma aceleração. De acordo com a segunda lei de Newton, deve existir uma segunda força, de sentido contrário ao da força aplicada por você, mas com o mesmo módulo, que equilibra a primeira força. Essa segunda força é uma força de atrito, paralela à superfície da mesa.
3. Empurre um caixote pesado paralelamente ao chão. O caixote não se move. De acordo com a segunda lei de Newton, uma segunda força deve estar atuando sobre o caixote para se opor à força que você está aplicando. Essa segunda força tem o mesmo módulo que a força que você aplicou, mas atua em sentido contrário, de

forma que as duas forças se equilibram. Essa segunda força é uma força de atrito. Empurre com mais força. O caixote continua parado. Isso significa que a força de atrito pode aumentar de intensidade para continuar equilibrando a força aplicada. Empurre com mais força ainda. O caixote começa a deslizar. Evidentemente, existe uma intensidade máxima para a força de atrito. Quando você excedeu essa intensidade máxima, o caixote começou a se mover.

A Fig. 6-1 mostra uma situação semelhante. Na Fig. 6-1a, um bloco está em repouso sobre uma mesa, com a força gravitacional  $\vec{F}_g$  equilibrada pela força normal  $\vec{F}_N$ .

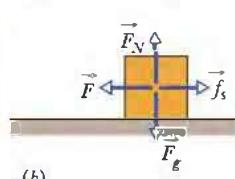


Como não é aplicada nenhuma força horizontal, não há atrito e não há movimento.



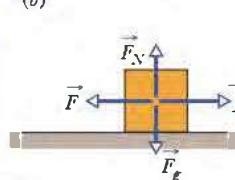
Força de atrito = 0

A força aplicada  $\vec{F}$  é equilibrada pela força de  $f_s$ . Não há movimento.



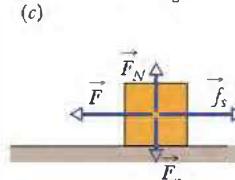
Força de atrito =  $F$

A força aplicada é maior, mas continua a ser equilibrada pela força de atrito. Não há movimento.



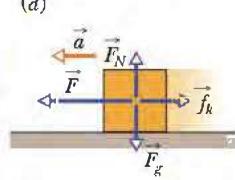
Força de atrito =  $F$

A força aplicada é ainda maior, mas continua a ser equilibrada pela força de atrito. Não há movimento.



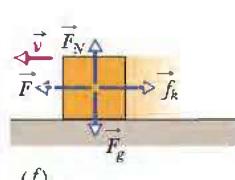
Força de atrito =  $F$

Finalmente, a força aplicada supera a força de atrito estático. O bloco começa a se mover e sofre uma aceleração.



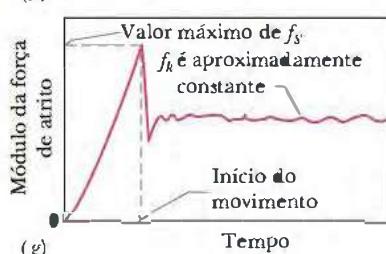
Força de atrito cinético <  $F$

Para manter a velocidade constante, é preciso reduzir a força aplicada, já que a força de atrito agora é menor.



A força de atrito cinético não muda

A força de atrito estático aumenta para equilibrar a força aplicada.



O valor da força de atrito cinético não depende da força aplicada.

**Figura 6-1** (a) As forças que agem sobre um bloco estacionário. (b-d) Uma força externa  $\vec{F}$ , aplicada ao bloco, é equilibrada por uma força de atrito estático  $\vec{f}_s$ . Quando  $\vec{F}$  aumenta,  $\vec{f}_s$  também aumenta, até atingir um certo valor máximo. (e) O bloco então “se desprende”, acelerando subitamente na direção de  $\vec{F}$ . (f) Para que o bloco se move com velocidade constante, é preciso reduzir o valor de  $F$ . (g) Alguns resultados experimentais para a sequência da (a) a (f).

$\vec{F}_N$ . Na Fig. 6-1b, você exerce uma força  $\vec{F}$  sobre o bloco, tentando puxá-lo para a esquerda. Em resposta, surge uma força de atrito  $\vec{f}_s$  para a direita, que equilibra a força que você aplicou. A força  $\vec{f}_s$  é chamada de **força de atrito estático**. O bloco permanece imóvel.

As Figs. 6-1c e 6-1d mostram que, à medida que você aumenta a intensidade da força aplicada, a intensidade da força de atrito estático  $\vec{f}_s$  também aumenta e o bloco permanece em repouso. Entretanto, quando a força aplicada atinge uma certa intensidade, o bloco “se desprende” da superfície da mesa e sofre uma aceleração para a esquerda (Fig. 6-1e). A força de atrito  $\vec{f}_k$  que se opõe ao movimento na nova situação é chamada de **força de atrito cinético**.

Em geral, a intensidade da força de atrito cinético, que age sobre os objetos em movimento, é menor do que a intensidade máxima da força de atrito estático, que age sobre os objetos em repouso. Assim, para que o bloco se move sobre a superfície com velocidade constante, provavelmente você terá que diminuir a intensidade da força aplicada depois que o bloco começar a se mover, como mostra a Fig. 6-1f. A Fig. 6-1g mostra o resultado de um experimento no qual a força aplicada a um bloco foi aumentada lentamente até que o bloco começasse a se mover. Observe que a força necessária para manter o bloco em movimento com velocidade constante é menor que a necessária para que o bloco comece a se mover.

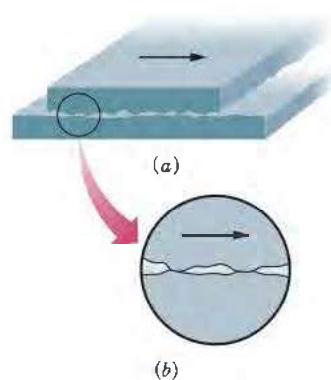
A força de atrito é, na verdade, a soma vetorial de muitas forças que agem entre os átomos da superfície de um corpo e os átomos da superfície do outro corpo. Se duas superfícies metálicas polidas e limpas são colocadas em contato em alto vácuo (para que continuem limpas), torna-se impossível fazer uma deslizar em relação à outra. Como as superfícies são lisas, muitos átomos de uma das superfícies entram em contato com muitos átomos da outra e as superfícies se *soldam a frio*, formando uma única peça de metal. Se dois blocos de metal, muito polidos, usados para calibrar tornos, são colocados em contato no ar, existe menos contato entre os átomos, mas, mesmo assim, os blocos aderem firmemente e só podem ser separados por um movimento de torção. Em geral, porém, esse grande número de contatos entre átomos não existe. Mesmo uma superfície metálica altamente polida está longe de ser uma superfície plana em escala atômica. Além disso, a superfície dos objetos comuns possui uma camada de óxidos e outras impurezas que reduzem a soldagem a frio.

Quando duas superfícies comuns são colocadas em contato, somente os pontos mais salientes se tocam. (É como se virássemos os Alpes Suíços de cabeça para baixo e os colocássemos em contato com os Alpes Austríacos.) A área *microscópica* de contato é muito menor que a aparente área de contato *macroscópica*, possivelmente  $10^4$  vezes menor. Mesmo assim, muitos pontos de contato se soldam a frio. Essas soldas são responsáveis pelo atrito estático que surge quando uma força aplicada tenta fazer uma superfície deslizar em relação à outra.

Se a força aplicada é suficiente para fazer uma das superfícies deslizar, ocorre uma ruptura das soldas (no instante em que começa o movimento) seguida por um processo contínuo de formação e ruptura de novas soldas enquanto ocorre o movimento relativo e novos contatos são formados aleatoriamente (Fig. 6-2). A força de atrito cinético  $\vec{f}_k$  que se opõe ao movimento é a soma vetorial das forças produzidas por esses contatos aleatórios.

Se as duas superfícies são pressionadas uma contra a outra com mais força, mais pontos se soldam a frio. Nesse caso, para fazer as superfícies deslizarem uma em relação à outra, é preciso aplicar uma força maior, ou seja, o valor da força de atrito estático  $\vec{f}_s$  é maior. Se as superfícies estão deslizando uma em relação à outra, passam a existir mais pontos momentâneos de soldagem a frio, de modo que a força de atrito cinético  $\vec{f}_k$  também é maior.

Frequentemente, o movimento de deslizamento de uma superfície em relação à outra ocorre “aos solavancos” porque os processos de soldagem e ruptura se alternam. Esses processos repetitivos de *aderência e deslizamento* podem produzir sons desagradáveis, como o cantar de pneus no asfalto, o barulho de uma unha arranhando



**Figura 6-2** Mecanismo responsável pela força de atrito cinético. (a) A placa de cima está deslizando para a direita em relação à placa de baixo. (b) Nesta vista ampliada são mostrados dois pontos onde ocorreu soldagem a frio. É necessária uma força para romper as soldas e manter o movimento.

um quadro-negro e o rangido de uma dobradiça enferrujada. Podem também produzir sons melodiosos, como o de um violino bem tocado.

### 6-3 Propriedades do Atrito

A experiência mostra que, quando um corpo seco não lubrificado pressiona uma superfície nas mesmas condições e uma força  $\vec{F}$  tenta fazer o corpo deslizar ao longo da superfície, a força de atrito resultante possui três propriedades:

**Propriedade 1.** Se o corpo não se move, a força de atrito estático  $\vec{f}_s$  e a componente de  $\vec{F}$  paralela à superfície se equilibram. As duas forças têm módulos iguais e  $\vec{f}_s$  tem o sentido oposto ao da componente de  $\vec{F}$ .

**Propriedade 2.** O módulo de  $\vec{f}_s$  possui um valor máximo  $f_{s,\max}$  que é dado por

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N, \quad (6-1)$$

onde  $\mu_s$  é o **coeficiente de atrito estático** e  $F_N$  é o módulo da força normal que a superfície exerce sobre o corpo. Se o módulo da componente de  $\vec{F}$  paralela à superfície excede  $f_{s,\max}$ , o corpo começa a deslizar sobre a superfície.

**Propriedade 3.** Se o corpo começa a deslizar sobre a superfície, o módulo da força de atrito diminui rapidamente para um valor  $f_k$  dado por

$$f_k = \mu_k F_N, \quad (6-2)$$

onde  $\mu_k$  é o **coeficiente de atrito cinético**. Daí em diante, durante o deslizamento, uma força de atrito cinético  $\vec{f}_k$  de módulo dado pela Eq. 6-2 se opõe ao movimento.

O módulo  $F_N$  da força normal aparece nas propriedades 2 e 3 como uma medida da força com a qual o corpo pressiona a superfície. De acordo com a terceira lei de Newton, se o corpo pressiona com mais força,  $F_N$  é maior. As propriedades 1 e 2 foram expressas em termos de uma única força aplicada  $\vec{F}$ , mas também são válidas para a resultante de várias forças aplicadas ao corpo. As Eqs. 6-1 e 6-2 *não são* equações vetoriais; os vetores  $\vec{f}_s$  e  $\vec{f}_k$  são sempre paralelos à superfície e têm o sentido oposto ao da tendência de deslizamento; o vetor  $\vec{F}_N$  é perpendicular à superfície.

Os coeficientes  $\mu_s$  e  $\mu_k$  são adimensionais e devem ser determinados experimentalmente. Seus valores dependem das propriedades tanto do corpo como da superfície; por isso, qualquer menção aos coeficientes de atrito costuma ser seguida pela preposição “entre”, como em “o valor de  $\mu_s$  entre um ovo e uma frigideira de Teflon é 0,04, mas o valor entre uma bota de alpinista e uma pedra pode chegar a 1,2”. Em geral, supomos que o valor de  $\mu_k$  não depende da velocidade com a qual o corpo desliza ao longo da superfície.



#### TESTE 1

Um bloco repousa sobre um piso. (a) Qual é o módulo da força de atrito que o piso exerce sobre o bloco? (b) Se uma força horizontal de 5 N é aplicada ao bloco, mas o bloco não se move, qual é o módulo da força de atrito? (c) Se o valor máximo  $f_{s,\max}$  da força de atrito estático que age sobre o bloco é 10 N, o bloco se move quando o módulo da força aplicada horizontalmente é aumentado para 8 N? (d) E se o módulo da força for aumentado para 12 N? (e) Qual é o módulo da força de atrito no item (c)?

#### Exemplo

##### Atrito cinético, aceleração constante, rodas bloqueadas

Se as rodas de um carro ficam “bloqueadas” (impedidas de girar) durante uma frenagem de emergência, o carro desliza na pista. Pedaços de borracha arrancados dos pneus e

pequenos trechos de asfalto fundido formam as “marcas de derrapagem” que revelam a ocorrência de uma soldagem a frio. O recorde de marcas de derrapagem em via pública

foi estabelecido em 1960 pelo motorista de um Jaguar na rodovia M1, na Inglaterra (Fig. 6-3a): as marcas tinham 290 m de comprimento! Supondo que  $\mu_k = 0,60$  e que a aceleração do carro se manteve constante durante a frenagem, qual era a velocidade do carro quando as rodas ficaram bloqueadas?

### IDEIAS-CHAVE

(1) Como estamos supondo que a aceleração é constante, podemos usar as equações da Tabela 2-1 para calcular a velocidade inicial do carro,  $v_0$ . (2) Se desprezarmos os efeitos do ar sobre o carro, a aceleração  $a$  se deveu apenas a uma força de atrito cinético  $\vec{f}_k$  exercida pela estrada sobre o carro, no sentido oposto ao do movimento do carro, que é o sentido positivo do eixo  $x$  (Fig. 6-3b). Podemos relacionar essa força à aceleração escrevendo a segunda lei de Newton para as componentes  $x$  ( $F_{\text{res},x} = ma_x$ ) como

$$-\vec{f}_k = ma, \quad (6-3)$$

onde  $m$  é a massa do carro. O sinal negativo indica o sentido da força de atrito cinético.

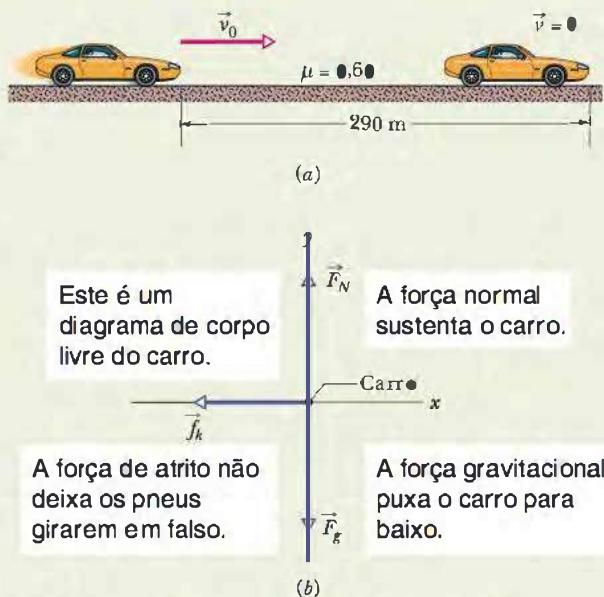
**Cálculos** De acordo com a Eq. 6-2, o módulo da força de atrito é  $f_k = \mu_k F_N$ , onde  $F_N$  é o módulo da força normal que a estrada exerce sobre o carro. Como o carro não está acelerando verticalmente, sabemos pela Fig. 6-3b e pela segunda lei de Newton que o módulo de  $\vec{F}_N$  é igual ao módulo da força gravitacional  $\vec{F}_g$  que age sobre o carro, que é igual a  $mg$ . Assim,  $F_N = mg$ .

Explicitando  $a$  na Eq. 6-3 e fazendo  $f_k = \mu_k F_N = \mu_k mg$ , temos:

$$a = -\frac{\vec{f}_k}{m} = -\frac{\mu_k mg}{m} = -\mu_k g, \quad (6-4)$$

onde o sinal negativo indica que a aceleração ocorre no sentido negativo do eixo  $x$ , o sentido oposto ao da velocidade. Em seguida, usamos a Eq. 2-16,

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0), \quad (6-5)$$



**Figura 6-3** (a) Um carro deslizando para a direita e finalmente parando após se deslocar 290 m. (b) Diagrama de corpo livre do carro.

uma das equações do Capítulo 2 para objetos com aceleração constante. Sabemos que o deslocamento  $x - x_0$  foi 290 m e supomos que a velocidade final  $v$  foi 0. Substituindo  $a$  pelo seu valor, dado pela Eq. 6-4, e explicitando  $v_0$ , obtemos

$$\begin{aligned} v_0 &= \sqrt{2\mu_k g(x - x_0)} \\ &= \sqrt{(2)(0,60)(9,8 \text{ m/s}^2)(290 \text{ m})} \\ &= 58 \text{ m/s} = 210 \text{ km/h}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta}) \quad (6-6)$$

Supusemos que  $v = 0$  na extremidade das marcas de derrapagem. Na verdade, as marcas terminaram apenas porque o Jaguar saiu da estrada depois de percorrer 290 m com as rodas bloqueadas. Assim, o valor de  $v_0$  era pelo menos 210 km/h.

### Exemplo

#### Atrito, força inclinada

Na Fig. 6-4a, um bloco de massa  $m = 3,0 \text{ kg}$  escorregue em um piso enquanto uma força  $\vec{F}$  de módulo 12 N, fazendo um ângulo  $\theta$  para cima com a horizontal, é aplicada ao bloco. O coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o piso é  $\mu_k = 0,40$ . O ângulo  $\theta$  pode variar de 0 a  $90^\circ$  (o bloco permanece sobre o piso). Qual é o valor de  $\theta$  para o qual o módulo  $a$  da aceleração do bloco é máximo?

### IDEIAS-CHAVE

Como o bloco está em movimento, a força de atrito envolvida é a força de atrito cinético. O módulo da força é

dado pela Eq. 6-2 ( $f_k = \mu_k F_N$ , onde  $F_N$  é a força normal). O sentido é oposto ao do movimento (o atrito se opõe ao escorregamento).

**Cálculo de  $F_N$**  Como precisamos conhecer o módulo  $f_k$  da força de atrito, vamos calcular primeiro o módulo  $F_N$  da força normal. A Fig. 6-4b é um diagrama de corpo livre que mostra as forças paralelas ao eixo vertical  $y$ . A força normal é para cima, a força gravitacional  $\vec{F}_g$ , de módulo  $mg$ , é para baixo e a componente vertical  $F_y$  da força aplicada é para cima. Essa componente aparece na Fig. 6-4c,

onde podemos ver que  $F_y = F \sin \theta$ . Podemos escrever a segunda lei de Newton ( $\vec{F}_{\text{res}} = m\vec{a}$ ) para essas forças ao longo do eixo  $y$  como

$$F_N + F \sin \theta - mg = m(0), \quad (6-7)$$

onde tomamos a aceleração ao longo do eixo  $y$  como zero (o bloco não se move ao longo deste eixo). Assim,

$$F_N = mg - F \sin \theta. \quad (6-8)$$

**Cálculo da aceleração  $a$**  A Fig. 6-4d é um diagrama de corpo livre para o movimento ao longo do eixo  $x$ . O sentido da componente horizontal  $F_x$  da força aplicada é para a direita; de acordo com a Fig. 6-4c,  $F_x = F \cos \theta$ . A força de atrito tem módulo  $f_k$  ( $= \mu_k F_N$ ) e aponta para a esquerda. Aplicando a segunda lei de Newton ao movimento ao longo do eixo  $x$ , temos:

$$F \cos \theta - \mu_k F_N = ma. \quad (6-9)$$

Substituindo  $F_N$  por seu valor, dado pela Eq. 6-8, e explicitando  $a$ , obtemos:

$$a = \frac{F}{m} \cos \theta - \mu_k \left( g - \frac{F}{m} \sin \theta \right). \quad (6-10)$$

A força aplicada acelera o bloco e diminui o peso aparente.

Essas forças verticais se cancelam.

**Cálculo do máximo** Para determinar o valor de  $\theta$  que maximiza  $a$ , derivamos  $a$  em relação a  $\theta$  e igualamos o resultado a zero:

$$\frac{da}{d\theta} = -\frac{F}{m} \sin \theta + \mu_k \frac{F}{m} \cos \theta = 0. \quad (6-11)$$

Reagrupando os termos e usando a identidade  $(\sin \theta)/(\cos \theta) = \tan \theta$ , obtemos

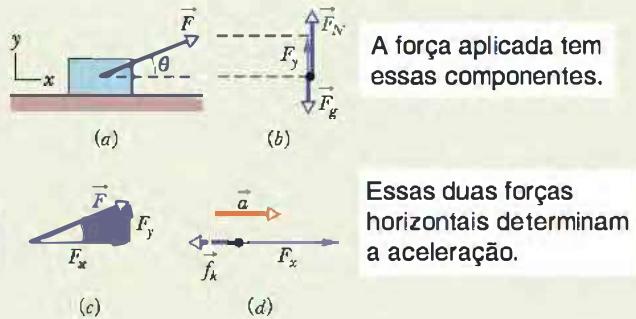
$$\tan \theta = \mu_k. \quad (6-12)$$

Explicitando  $\theta$  e substituindo  $\mu_k$  pelo seu valor numérico ( $\mu_k = 0,40$ ), descobrimos que a aceleração é máxima para

$$\theta = \tan^{-1} \mu_k \quad (6-13)$$

$$= 21,8^\circ \approx 22^\circ. \quad (\text{Resposta})$$

**Comentário** Quando aumentamos  $\theta$  a partir de 0, a componente  $y$  da força aplicada  $\vec{F}$  aumenta, o que diminui a força normal. Esta diminuição da força normal faz diminuir a força de atrito, que se opõe ao movimento do bloco. Assim, a aceleração do bloco tende a aumentar. Ao mesmo tempo, porém, o aumento de  $\theta$  diminui a componente horizontal de  $\vec{F}$ , o que diminui a aceleração. Essas tendências opostas fazem com que a aceleração seja máxima para  $\theta = 22^\circ$ .



**Figura 6-4** (a) Uma força é aplicada a um bloco em movimento. (b) As forças verticais. (c) As componentes da força aplicada. (d) As forças horizontais e a aceleração.

## 6-4 Força de Arrasto e Velocidade Terminal

Um fluido é uma substância, em geral um gás ou um líquido, capaz de escoar. Quando existe uma velocidade relativa entre um fluido e um corpo sólido (seja porque o corpo se move através do fluido, seja porque o fluido passa pelo corpo), o corpo experimenta uma **força de arrasto  $D$**  que se opõe ao movimento relativo e é paralela à direção do movimento relativo do fluido.

Examinaremos aqui apenas os casos em que o fluido é o ar, o corpo é rombudo (como uma bola) e não fino e pontiagudo (como um dardo) e o movimento relativo é suficientemente rápido para produzir uma turbulência no ar (formação de redemoinhos) atrás do corpo. Nesse caso, o módulo da força de arrasto  $D$  está relacionado à velocidade escalar  $v$  através da equação

$$D = \frac{1}{2} C \rho A v^2, \quad (6-14)$$

onde  $C$  é um parâmetro determinado experimentalmente, conhecido como **coeficiente de arrasto**,  $\rho$  é a massa específica do ar (massa por unidade de volume) e  $A$  é a **área da seção reta efetiva** do corpo (a área de uma seção reta perpendicular à velocidade  $v$ ). O coeficiente de arrasto  $C$  (cujos valores típicos variam de 0,4 a 1,0)

**Tabela 6-1****Algumas Velocidades Terminais no Ar**

Objeto	Velocidade Terminal (m/s)	Distância <sup>a</sup> para 95% (m)
Peso (do arremesso de peso)	145	2500
Paraquedista em queda livre (típico)	60	430
Bola de beisebol	42	210
Bola de tênis	31	115
Bola de basquete	20	47
Bola de pingue-pongue	9	10
Gota de chuva (raio = 1,5 mm)	7	6
Paraquedista (típico)	5	3

<sup>a</sup> Distância da queda necessária para atingir 95% da velocidade terminal.

Fonte: adaptado de Peter J. Brancazio, *Sport Science*, 1984, Simon & Schuster, New York.

não é constante para um dado corpo, já que depende da velocidade. Aqui, ignoraremos tais complicações.

Os esquiadores sabem muito bem que a força de arrasto depende de  $A$  e de  $v^2$ . Para alcançar altas velocidades, um esquiador procura reduzir o valor de  $D$ , adotando, por exemplo, a “posição de ovo” (Fig. 6-5) para minimizar  $A$ .

Quando um corpo rombudo cai a partir do repouso, a força de arrasto  $\vec{D}$  produzida pela resistência do ar é dirigida para cima e seu módulo cresce gradualmente, a partir de zero, com o aumento da velocidade do corpo. A força  $\vec{D}$  para cima se opõe à força gravitacional  $\vec{F}_g$ , dirigida para baixo. Podemos relacionar essas forças à aceleração do corpo escrevendo a segunda lei de Newton para um eixo vertical  $y$  ( $F_{res,y} = ma_y$ ):

$$D - F_g = ma_y \quad (6-15)$$

onde  $m$  é a massa do corpo. Como mostra a Fig. 6-6, se o corpo cai por um tempo suficiente,  $D$  acaba se tornando igual a  $F_g$ . De acordo com a Eq. 6-15, isso significa que  $a = 0$  e, portanto, a velocidade do corpo para de aumentar. O corpo passa, então, a cair com uma velocidade constante, a chamada **velocidade terminal**  $v_t$ .

Para determinar  $v_t$ , fazemos  $a = 0$  na Eq. 6-15 e substituímos o valor de  $D$  dado pela Eq. 6-14, obtendo

$$\frac{1}{2}C\rho A v_t^2 - F_g = 0,$$

onde

$$v_t = \sqrt{\frac{2F_g}{C\rho A}}. \quad (6-16)$$

A Tabela 6-1 mostra os valores de  $v_t$  para alguns objetos comuns.

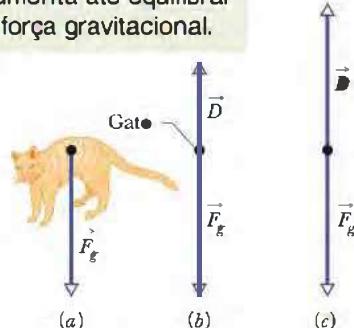
De acordo com cálculos\* baseados na Eq. 6-14, um gato precisa cair cerca de seis andares para atingir a velocidade terminal. Até que isso aconteça,  $F_g > D$  e o gato sofre uma aceleração para baixo porque a força resultante é diferente de zero. Como vimos no Capítulo 2, nosso corpo é um acelerômetro e não um velocímetro. Como o gato também sente a aceleração, fica assustado e mantém as patas abaixas do corpo, encolhe a cabeça e encurva a espinha para cima, reduzindo a área  $A$ , aumentando  $v_t$  e provavelmente se ferindo na queda.

Entretanto, se o gato atinge  $v_t$  durante uma queda mais longa, a aceleração se anula e o gato relaxa um pouco, esticando as patas e pescoço horizontalmente para fora e endireitando a espinha (o que o faz ficar parecido com um esquilo voador). Isso produz um aumento da área  $A$  e, consequentemente, de acordo com a Eq. 6-14,



**Figura 6-5** A esquiadora se agacha na “posição de ovo” para minimizar a área da seção reta efetiva e assim reduzir a força de arrasto. (Karl-Josef Hildenbrand/dpa/LLC)

Quando a velocidade do gato aumenta, a força de arrasto aumenta até equilibrar a força gravitacional.



**Figura 6-6** Forças a que está submetido um corpo em queda livre no ar. (a) O corpo no momento em que começa a cair; a única força presente é a força gravitacional. (b) Diagrama de corpo livre durante a queda, incluindo a força de arrasto. (c) A força de arrasto aumentou até se tornar igual à força gravitacional. O corpo agora cai com velocidade constante, a chamada velocidade terminal.

\* W.O. Whitney e C.J. Mehlhoff, “HighRise Syndrome in Cats”. *The Journal of the American Veterinary Medical Association*, 1987.



**Figura 6-7** Paraquedistas na “posição de águia”, que maximiza a força de arrasto. (Steve Fitchett/Taxi/Getty Images)

um aumento da força de arrasto  $D$ . O gato começa a diminuir de velocidade, já que, agora,  $D > F_g$  (a força resultante aponta para cima), até que uma velocidade terminal  $v_t$  menor seja atingida. A diminuição de  $v_t$  reduz a possibilidade de que o gato se machuque na queda. Pouco antes do fim da queda, ao perceber que o chão está próximo, o gato coloca novamente as patas abaixo do corpo, preparando-se para o pouso.

Os seres humanos muitas vezes saltam de grandes alturas apenas pelo prazer de “voar”. Em abril de 1987, durante um salto, o paraquedista Gregory Robertson percebeu que a colega Debbie Williams havia desmaiado ao colidir com um terceiro paraquedista e, portanto, não tinha como abrir o paraquedas. Robertson, que estava muito acima de Debbie e ainda não tinha aberto o paraquedas para a descida de 4 mil metros, colocou-se de cabeça para baixo para minimizar  $A$  e maximizar a velocidade da queda. Depois de atingir uma velocidade terminal estimada de 320 km/h, alcançou a moça e assumiu a “posição de águia” (como na Fig. 6-7) para aumentar  $D$  e conseguir agarrá-la. Abriu o paraquedas da moça e em seguida, após soltá-la, abriu o próprio paraquedas, quando faltavam apenas 10 segundos para o impacto. Williams sofreu várias lesões internas devido à falta de controle na aterrissagem, mas sobreviveu.

### Exemplo

#### Velocidade terminal de uma gota de chuva

Uma gota de chuva de raio  $R = 1,5 \text{ mm}$  cai de uma nuvem que está a uma altura  $h = 1200 \text{ m}$  acima do solo. O coeficiente de arrasto  $C$  da gota é 0,60. Suponha que a gota permanece esférica durante toda a queda. A massa específica da água,  $\rho_a$ , é  $1000 \text{ kg/m}^3$  e a massa específica do ar,  $\rho_{ar}$ , é  $1,2 \text{ kg/m}^3$ .

(a) De acordo com a Tabela 6-1, a gota atinge a velocidade terminal depois de cair apenas alguns metros. Qual é a velocidade terminal?

#### IDEIA-CHAVE

A gota atinge a velocidade terminal  $v_t$ , quando a força gravitacional e a força de arrasto se equilibram, fazendo com que a aceleração seja nula. Poderíamos aplicar a segunda lei de Newton e a equação da força de arrasto para calcular  $v_t$ , mas a Eq. 6-16 já faz isso para nós.

**Cálculos** Para usar a Eq. 6-16, precisamos conhecer a área efetiva da seção reta  $A$  e o módulo  $F_g$  da força gravitacional. Como a gota é esférica,  $A$  é a área de um círculo ( $\pi R^2$ ) com o mesmo raio que a esfera. Para determinar  $F_g$ , usamos três fatos: (1)  $F_g = mg$ , onde  $m$  é a massa da gota; (2) o volume da gota (esférica) é  $V = \frac{4}{3}\pi R^3$  e (3) a massa específica da água da gota é igual à massa por unidade de volume:  $\rho_a = m/V$ . Assim, temos;

$$F_g = V\rho_a g = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_a g.$$

Em seguida, substituímos esse resultado, a expressão para  $A$  e os valores conhecidos na Eq. 6-16. Tomando cuidado

para não confundir a massa específica do ar,  $\rho_{ar}$ , com a massa específica da água,  $\rho_a$ , obtemos:

$$\begin{aligned} v_t &= \sqrt{\frac{2F_g}{C\rho_a A}} = \sqrt{\frac{8\pi R^3 \rho_a g}{3C\rho_a \pi R^2}} = \sqrt{\frac{8R\rho_a g}{3C}} \\ &= \sqrt{\frac{(8)(1.5 \times 10^{-3} \text{ m})(1000 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)}{(3)(0.60)(1.2 \text{ kg/m}^3)}} \\ &= 7.4 \text{ m/s} \approx 27 \text{ km/h}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Note que a altura da nuvem não entra no cálculo.

(b) Qual seria a velocidade da gota imediatamente antes do impacto com o chão se não existisse a força de arrasto?

#### IDEIA-CHAVE

Na ausência da força de arrasto para reduzir a velocidade da gota durante a queda, a gota cairia com a aceleração constante de queda livre  $g$  e, portanto, as equações do movimento com aceleração constante da Tabela 2-1 podem ser usadas.

**Cálculo** Como sabemos que a aceleração é  $g$ , a velocidade inicial  $v_0$  é zero e o deslocamento  $x - x_0$  é  $-h$ , usamos a Eq. 2-16 para calcular  $v$ :

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{2gh} = \sqrt{(2)(9.8 \text{ m/s}^2)(1200 \text{ m})} \\ &= 153 \text{ m/s} \approx 550 \text{ km/h}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Se Shakespeare soubesse disso, dificilmente teria escrito: “Gota a gota ela cai, tal como a chuva benéfica do céu.”

Na verdade, esta é a velocidade de uma bala disparada por uma arma de grosso calibre!

## 6-5 Movimento Circular Uniforme

Como vimos na Seção 4-7, quando um corpo descreve uma circunferência (ou um arco de circunferência) com velocidade escalar constante  $v$ , dizemos que se encontra em movimento circular uniforme. Vimos também que o corpo possui uma aceleração centrípeta (dirigida para o centro da circunferência) de módulo constante dado por

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (\text{aceleração centrípeta}). \quad (6-17)$$

onde  $R$  é o raio do círculo.

Vamos examinar dois exemplos de movimento circular uniforme:

- Fazendo uma curva de carro.** Você está sentado no centro do banco traseiro de um carro que se move em alta velocidade em uma estrada plana. Quando o motorista faz uma curva brusca para a esquerda e o carro descreve um arco de circunferência, você escorrega para a direita sobre o assento e fica comprimido contra a porta do carro durante o resto da curva. O que está acontecendo?

Enquanto o carro está fazendo a curva, ele se encontra em movimento circular uniforme, ou seja, possui uma aceleração dirigida para o centro da circunferência. De acordo com a segunda lei de Newton, deve haver uma força responsável por essa aceleração. Além disso, a força também deve estar dirigida para o centro da circunferência. Assim, trata-se de uma **força centrípeta**, onde o adjetivo indica a direção da força. Neste exemplo, a força centrípeta é a força de atrito exercida pela estrada sobre os pneus; é graças a essa força que o carro consegue fazer a curva.

Para você descrever um movimento circular uniforme junto com o carro, também deve existir uma força centrípeta agindo sobre você. Entretanto, aparentemente, a força centrípeta de atrito exercida pelo assento não foi suficiente para fazê-lo acompanhar o movimento circular do carro. Assim, o assento deslizou por baixo de você até a porta direita do carro se chocar com o seu corpo. A partir desse momento, a porta forneceu a força centrípeta necessária para fazê-lo acompanhar o carro no movimento circular uniforme.

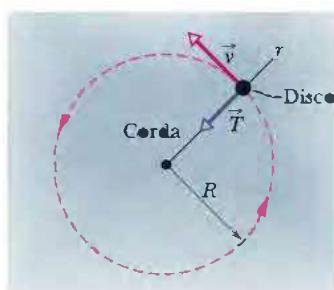
- Girando em torno da Terra.** Desta vez, você está a bordo do ônibus espacial *Atlantis*. Quando você e o ônibus espacial estão em órbita em torno da Terra, você flutua, como se não tivesse peso. O que está acontecendo?

Tanto você como o ônibus espacial estão em movimento circular uniforme e possuem uma aceleração dirigida para o centro da circunferência. Novamente, pela segunda lei de Newton, forças centrípetas devem ser a causa dessas acelerações. Desta vez, as forças centrípetas são atrações gravitacionais (a atração sobre você e a atração sobre o ônibus espacial) exercidas pela Terra e dirigidas para o centro da Terra.

Tanto no carro como no ônibus espacial, você está em movimento circular uniforme sob a ação de uma força centrípeta, mas experimenta sensações bem diferentes nas duas situações. No carro, comprimido contra a porta traseira, você tem consciência de que está sendo submetido a uma força. No ônibus espacial, está flutuando e tem a impressão de que não está sujeito a nenhuma força. Qual é a razão desta diferença?

A diferença se deve à natureza das duas forças centrípetas. No carro, a força centrípeta é a compressão a que é submetida a parte do seu corpo que está em contato com a porta do carro. Você pode sentir essa compressão. No ônibus espacial, a força centrípeta é a atração gravitacional da Terra sobre todos os átomos do seu corpo. Assim, nenhuma parte do corpo sofre uma compressão e você não sente nenhuma força. (A sensação é conhecida como “ausência de peso”, mas essa descrição é enganosa. A atração exercida pela Terra sobre você certamente não desapareceu e, na verdade, é apenas ligeiramente menor da que existe quando você está na superfície da Terra.)

A Fig. 6-8 mostra outro exemplo de força centrípeta. Um disco de metal descreve uma circunferência com velocidade constante  $v$ , preso por uma corda a um



O disco só descreve um movimento circular porque existe uma força na direção do centro.

**Figura 6-8** Vista de cima de um disco de metal que se move com velocidade constante  $v$  em uma trajetória circular de raio  $R$  sobre uma superfície horizontal sem atrito. A força centrípeta que age sobre o disco é  $\vec{T}$ , a tração da corda, dirigida para o centro da circunferência ao longo do eixo radial  $r$  que passa pelo disco.

eixo central. Desta vez, a força centrípeta é a tração exercida radialmente pela corda sobre o disco. Sem essa força, o disco se moveria em linha reta em vez de se mover em círculos.

Observe que a força centrípeta não é um novo tipo de força; o nome simplesmente indica a direção da força. A força centrípeta pode ser uma força de atrito, uma força gravitacional, a força exercida pela porta de um carro, a força exercida por uma corda ou qualquer outra força. Em qualquer situação:



Uma força centrípeta acelera um corpo modificando a direção da velocidade do corpo sem mudar a velocidade escalar.

De acordo com a segunda lei de Newton e a Eq. 6-17 ( $a = v^2/R$ ), podemos escrever o módulo  $F$  de uma força centrípeta (ou de uma força centrípeta resultante) como

$$F = m \frac{v^2}{R} \quad (\text{módulo da força centrípeta}). \quad (6-18)$$

Como a velocidade escalar  $v$ , neste caso, é constante, os módulos da aceleração centrípeta e da força centrípeta também são constantes.

Por outro lado, as direções da aceleração centrípeta e da força centrípeta não são constantes; variam continuamente de modo a apontar sempre para o centro do círculo. Por essa razão, os vetores força e aceleração são, às vezes, desenhados ao longo de um eixo radial  $r$  que se move com o corpo e se estende do centro do círculo até o corpo, como na Fig. 6-8. O sentido positivo do eixo aponta radialmente para fora, mas os vetores aceleração e força apontam para dentro ao longo da direção radial.



## TESTE 2

Quando você anda de roda-gigante com velocidade constante, que são as direções da sua aceleração  $\ddot{a}$  e da força normal  $\vec{F}_N$  exercidas sobre você pelo assento (que está sempre na vertical) quando você passa (a) pelo ponto mais alto e (b) pelo ponto mais baixo da roda?

## Exemplo

### Diavolo executa um *loop* vertical

Em 1901, em um espetáculo de circo, Allo “Dare Devil” Diavolo apresentou pela primeira vez um número de acrobacia que consistia em descrever um *loop* vertical pedalando uma bicicleta (Fig. 6-9a). Supondo que o *loop* seja um círculo de raio  $R = 2,7\text{ m}$ , qual é a menor velocidade  $v$  que Diavolo podia ter na parte mais alta do *loop* para permanecer em contato com a pista?

#### IDEIA-CHAVE

Podemos supor que Diavolo e sua bicicleta passam pela parte mais alta do *loop* como uma única partícula em movimento circular uniforme. Assim, no alto, a aceleração  $\ddot{a}$  dessa partícula deve ter módulo  $a = v^2/R$  dado pela Eq. 6-17 e estar voltada para baixo, em direção ao centro do *loop* circular.

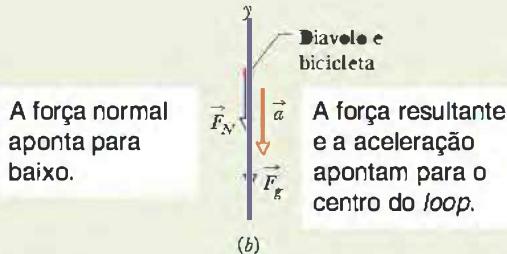
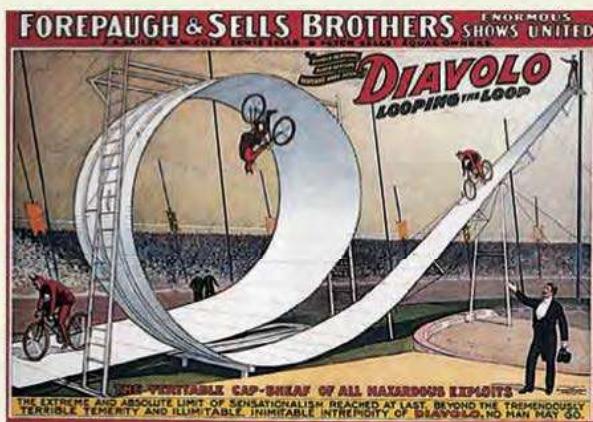
**Cálculos** As forças que agem sobre a partícula quando está na parte mais alta do *loop* são mostradas no diagrama de cor-

po livre da Fig. 6-9b. A força gravitacional  $\vec{F}_g$  aponta para baixo ao longo do eixo  $y$ ; o mesmo acontece com a força normal  $\vec{F}_N$  exercida pelo *loop* sobre a partícula. A segunda lei de Newton para as componentes  $y$  ( $F_{\text{res},y} = ma_y$ ) nos dá

$$\begin{aligned} -F_N - F_g &= m(-a) \\ \text{e} \quad -F_N - mg &= m\left(-\frac{v^2}{R}\right). \end{aligned} \quad (6-19)$$

Se a partícula possui a menor velocidade  $v$  necessária para permanecer em contato com a pista, está na iminência de perder contato com o *loop* (cair do *loop*), o que significa que  $F_N = 0$  no alto do *loop* (a partícula e o piso se tocam, mas não há força normal). Substituindo  $F_N$  por 0 na Eq. 6-19, explicitando  $v$  e substituindo os valores conhecidos, obtemos

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{gR} = \sqrt{(9,8\text{ m/s}^2)(2,7\text{ m})} \\ &= 5,1\text{ m/s}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$



**Figura 6-9** (a) Cartaz da época anunciando o número de Diavolo e (b) diagrama de corpo livre do artista na parte mais alta do loop. (Fotografia da parte a reproduzida com permissão do Circus World Museum)

**Comentários** Diavolo sempre se certificava de que sua velocidade no alto do loop era maior do que 5,1 m/s, a velocidade mínima necessária para não perder contato com o loop e cair. Note que essa velocidade não depende da massa de

Diavolo e sua bicicleta. Mesmo que tivesse se empanturado antes de se apresentar, a velocidade mínima necessária para não cair do loop seria os mesmos 5,1 m/s.

### Exemplo

#### Carro em uma curva não compensada

**Correndo de cabeça para baixo** Os carros de corrida modernos são projetados de tal forma que o ar em movimento os empurra para baixo, permitindo que façam as curvas em alta velocidade sem deirapar. Esta força para baixo é chamada de *sustentação negativa*. Um carro de corrida pode ter uma sustentação negativa suficiente para andar de cabeça para baixo no teto de uma construção, como fez um carro fictício no filme *MIB – Homens de Preto*?

A Fig. 6-10a mostra um carro de corrida de massa  $m = 600 \text{ kg}$  se movendo em uma pista plana na forma de um arco de circunferência de raio  $R = 100 \text{ m}$ . Devido à forma do carro e aos aerofólios, o ar que passa exerce sobre o carro uma sustentação negativa  $\vec{F}_s$  dirigida para baixo. O coeficiente de atrito estático entre os pneus e a pista é 0,75. (Suponha que as forças sobre os quatro pneus são iguais.)

- (a) Se o carro se encontra na iminência de deirapar para fora da curva quando a velocidade escalar é  $28,6 \text{ m/s}$ , qual é o módulo de  $\vec{F}_s$ ?

#### IDEIAS-CHAVE

- Como a trajetória do carro é um arco de circunferência, ele está sujeito a uma força centrípeta; essa força aponta para o centro de curvatura do arco (no caso, é uma força horizontal).
- A única força horizontal a que o carro está sujeito é a força de atrito exercida pela pista sobre os pneus. Assim, a força centrípeta é uma força de atrito.

- Como o carro não está derrapando, a força de atrito é a força de atrito estático  $\vec{f}_s$  (Fig. 6-10a).
- Como o carro se encontra na iminência de derrapar, o módulo  $f_s$  da força de atrito é igual ao valor máximo  $f_{s,\max} = \mu_s F_N$ , onde  $F_N$  é o módulo da força normal  $\vec{F}_N$  que a pista exerce sobre o carro.

**Cálculo para a direção radial** A força de atrito  $\vec{f}_s$  é mostrada no diagrama de corpo livre da Fig. 6-10b. Ela aponta no sentido negativo do eixo radial  $r$  que se estende do centro de curvatura até o carro. A força produz uma aceleração centrípeta de módulo  $v^2/R$ . Podemos relacionar a força e a aceleração escrevendo a segunda lei de Newton para as componentes ao longo do eixo  $r$  ( $F_{res,r} = ma_r$ ) na forma

$$-f_s = m \left( -\frac{v^2}{R} \right). \quad (6-20)$$

Substituindo  $f_s$  por  $f_{s,\max} = \mu_s F_N$  temos:

$$\mu_s F_N = m \left( \frac{v^2}{R} \right). \quad (6-21)$$

**Cálculo para a direção vertical** Vamos considerar em seguida as forças verticais que agem sobre o carro. A força normal  $\vec{F}_N$  aponta para cima, no sentido positivo do eixo  $y$  da Fig. 6-10b. A força gravitacional  $\vec{F}_g = m\vec{g}$  e a sustentação negativa  $\vec{F}_s$  apontam para baixo. A aceleração do carro ao longo do eixo  $y$  é zero. Assim, podemos escrever a segunda lei de Newton para as componentes ao longo do eixo  $y$  ( $F_{res,y} = ma_y$ ) na forma

$$F_N - mg - F_S = 0,$$

ou

$$F_N = mg + F_S. \quad (6-22)$$

**Combinação dos resultados** Agora podemos combinar os resultados ao longo dos dois eixos explicitando  $F_N$  na Eq. 6-21 e substituindo na Eq. 6-22. Fazendo isso e explicitando  $F_S$ , obtemos

$$\begin{aligned} F_S &= m \left( \frac{v^2}{\mu_s R} - g \right) \\ &= (600 \text{ kg}) \left( \frac{(28.6 \text{ m/s})^2}{(0.75)(100 \text{ m})} - 9.8 \text{ m/s}^2 \right) \\ &= 663.7 \text{ N} \approx 660 \text{ N}. \end{aligned}$$

(Resposta)

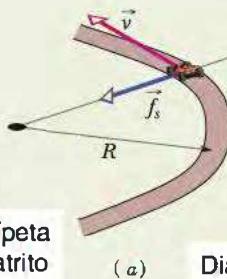
(b) Como a força de arrasto (Eq. 6-14), o módulo  $F_S$  da sustentação negativa do carro é proporcional a  $v^2$ , o quadrado da velocidade do carro. Assim, a sustentação negativa é maior quando o carro está se movendo mais depressa, como acontece quando se desloca em um trecho reto da pista. Qual é o módulo da sustentação negativa para uma velocidade de 90 m/s?

### IDEIA-CHAVE

$F_S$  é proporcional a  $v^2$ .

**Figura 6-10** (a) Um carro de corrida descreve uma curva em uma pista plana com velocidade escalar constante  $v$ . A força centrípeta necessária para que o carro faça a curva é a força de atrito  $\vec{f}_s$ , orientada segundo um eixo radial  $r$ . (b) Diagrama de corpo livre do carro (fora de escala), em um plano vertical passando por  $r$ .

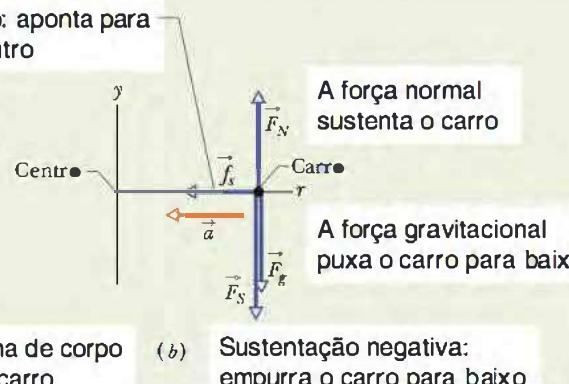
A força centrípeta  
é a força de atrito



(a)

Diagrama de corpo  
livre do carro

Atrito: aponta para  
o centro



(b)

Sustentação negativa:  
empurra o carro para baixo

### Exemplo

#### Carro em uma curva compensada

As curvas das rodovias costumam ser compensadas (inclinadas) para evitar que os carros derrapem. Quando a estrada está seca, a força de atrito entre os pneus e o piso é suficiente para evitar derrapagens, mesmo sem compensação. Quando a pista está molhada, porém, a força de atrito diminui muito e a compensação se torna essencial. A Fig. 6-11a mostra um carro de massa  $m$  que se move com uma velocidade escalar constante  $v$  de 20 m/s em uma pista circular compensada com  $R = 190$  m de raio. (Trata-se de um carro normal e não de um carro de corrida, o que significa que não existe sustentação negativa.)

Se a força de atrito exercida pelo piso é desprezível, qual é o menor valor do ângulo de elevação  $\theta$  para o qual o carro não derrapa?

### IDEIAS-CHAVE

Ao contrário do que acontece no exemplo anterior, a pista possui uma inclinação para que a força normal  $\vec{F}_N$  que age sobre o carro tenha uma componente na direção do centro da curva (Fig. 6-11b). Assim,  $\vec{F}_N$  possui agora uma componente centrípeta, de módulo  $F_{Nc}$ , na direção radial  $r$ . Queremos calcular o valor do ângulo de inclinação  $\theta$  para

que esta componente centrípeta mantenha o carro na pista circular sem necessidade do atrito.

**Cálculo na direção radial** Como mostra a Fig. 6-11b (e o leitor pode verificar), o ângulo que a força  $\vec{F}_N$  faz com a vertical é igual ao ângulo de inclinação  $\theta$  da pista. Assim, a componente radial  $F_{Nr}$  é igual a  $F_N \sin \theta$  e a segunda lei de Newton para as componentes ao longo do eixo  $r$  ( $F_{res,r} = ma_r$ ) assume a seguinte forma:

$$-F_N \sin \theta = m \left( -\frac{v^2}{R} \right). \quad (6-23)$$

Não podemos obter o valor de  $\theta$  usando apenas esta equação porque ela também contém as incógnitas  $F_N$  e  $m$ .

**Cálculo na direção vertical** Vamos considerar as forças e acelerações ao longo do eixo  $y$  da Fig. 6-11b. A componente vertical da força normal é  $F_{Ny} = F_N \cos \theta$ , a força

gravitacional  $\vec{F}_g$  tem módulo  $mg$  e a aceleração do carro ao longo do eixo  $y$  é zero. Assim, a segunda lei de Newton para as componentes ao longo do eixo  $y$  ( $F_{res,y} = ma_y$ ) assume a seguinte forma:

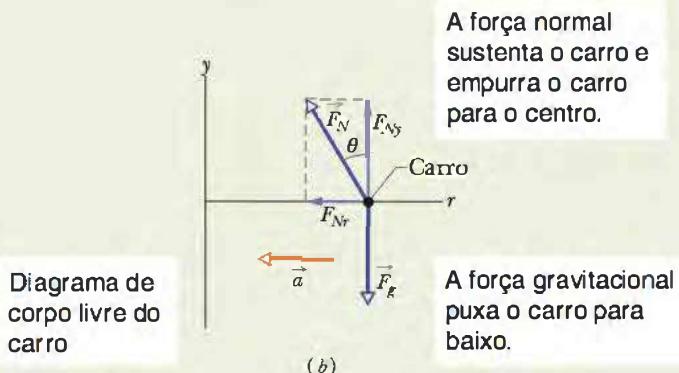
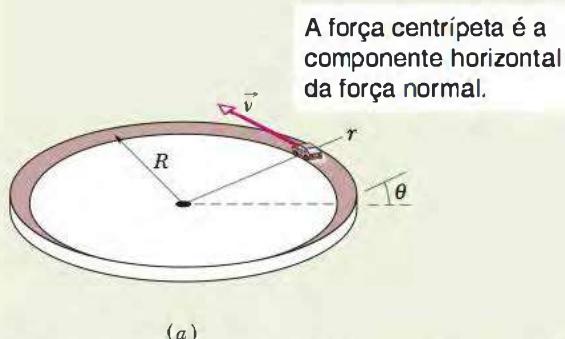
$$F_N \cos \theta - mg = m(0),$$

onde

$$F_N \cos \theta = mg. \quad (6-24)$$

**Combinação dos resultados** A Eq. 6-24 também contém as incógnitas  $F_N$  e  $m$ , mas observe que, dividindo a Eq. 6-23 pela Eq. 6-24, eliminamos as duas incógnitas. Procedendo desta forma, substituindo  $(\sin \theta)/(\cos \theta)$  por  $\tan \theta$  e explicitando  $\theta$ , obtemos

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{v^2}{gR} \\ &= \tan^{-1} \frac{(20 \text{ m/s})^2}{(9,8 \text{ m/s}^2)(190 \text{ m})} = 12^\circ. \quad (\text{Resposta}) \end{aligned}$$



**Figura 6-11** (a) Um carro faz uma curva compensada com velocidade escalar constante  $v$ . O ângulo de inclinação está exagerado para maior clareza. (b) Diagrama de corpo livre do carro, supondo que o atrito entre os pneus e a estrada é nulo e que o carro não possui sustentação negativa. A componente radial  $F_{Nr}$  da força normal (ao longo do eixo radial  $r$ ) fornece a força centrípeta e a aceleração radial necessárias.

## REVISÃO E RESUMO

**Atrito** Quando uma força  $\vec{F}$  tende a fazer um corpo deslizar em uma superfície, a superfície exerce uma **força de atrito** sobre o corpo. A força de atrito é paralela à superfície e está orientada de modo a se opor ao movimento. Esta força se deve às ligações entre os átomos do corpo e os átomos da superfície.

Se o corpo permanece imóvel, a força de atrito é a **força de atrito estático**  $f_s$ . Se o corpo se move, a força de atrito é a **força de atrito cinético**  $f_k$ .

- Se um corpo permanece imóvel, a força de atrito estático  $f_s$  e a componente de  $\vec{F}$  paralela à superfície têm módulos iguais e sentidos opostos. Se a componente de  $\vec{F}$  aumenta,  $f_s$  também aumenta.
- O módulo de  $f_s$  tem um valor máximo  $f_{s,\max}$  dado por

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N, \quad (6-1)$$

onde  $\mu_s$  é o **coeficiente de atrito estático** e  $F_N$  é o módulo da

força normal. Se a componente de  $\vec{F}$  paralela à superfície excede o valor de  $f_{s,\max}$ , o corpo começa a se mover.

- Se o corpo começa a se mover, o módulo da força de atrito diminui rapidamente para um valor constante  $f_k$  dado por

$$f_k = \mu_k F_N, \quad (6-2)$$

onde  $\mu_k$  é o **coeficiente de atrito cinético**.

**Força de Arrasto** Quando há movimento relativo entre o ar (ou outro fluido qualquer) e um corpo, o corpo sofre a ação de uma **força de arrasto**  $\vec{D}$  que se opõe ao movimento relativo e aponta na direção em que o fluido se move em relação ao corpo. O módulo de  $\vec{D}$  está relacionado à velocidade relativa  $v$  através de um **coeficiente de arrasto**  $C$  (determinado experimentalmente) através da equação

$$D = \frac{1}{2} C \rho A v^2, \quad (6-14)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido (massa por unidade de volume) e  $A$  é a **área da seção reta efetiva** do corpo (área de uma seção reta perpendicular à velocidade relativa  $\vec{v}$ ).

**Velocidade Terminal** Quando um objeto rombudo cai por uma distância suficiente no ar, os módulos da força de arrasto  $\vec{D}$  e da força gravitacional  $\vec{F}_g$  tornam-se iguais. Nesse caso, o corpo passa a cair com uma **velocidade terminal**  $v_t$ , dada por

$$v_t = \sqrt{\frac{2F_g}{C\rho A}} \quad (6-16)$$

**Movimento Circular Uniforme** Se uma partícula se move em uma circunferência ou em um arco de circunferência de raio  $R$  com

uma velocidade escalar constante  $v$ , dizemos que a partícula está em **movimento circular uniforme**. Nesse caso, a partícula possui uma **aceleração centrípeta**  $\vec{a}$  cujo módulo é dado por

$$a = \frac{v^2}{R}. \quad (6-17)$$

Esta aceleração se deve a uma **força centrípeta** cujo módulo é dado por

$$F = \frac{mv^2}{R}, \quad (6-18)$$

onde  $m$  é a massa da partícula. As grandezas vetoriais  $\vec{a}$  e  $\vec{F}$  apontam para o centro de curvatura da trajetória da partícula.

## P E R G U N T A S

**1** Na Fig. 6-12, se a caixa está parada e o ângulo  $\theta$  entre a horizontal e a força  $\vec{F}$  aumenta, as grandezas a seguir aumentam, diminuem ou permanecem com o mesmo valor: (a)  $F_x$ ; (b)  $f_s$ ; (c)  $F_N$ ; (d)  $f_{s,\max}$ ? (e) Se a caixa está em movimento e  $\theta$  aumenta, o módulo da força de atrito a que a caixa está submetida aumenta, diminui ou permanece o mesmo?

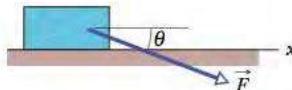


Figura 6-12 Pergunta 1.

**2** Repita a Pergunta 1 para o caso de a força  $\vec{F}$  estar orientada para cima e não para baixo, como na Fig. 6-12.

**3** Na Fig. 6-13, uma força horizontal  $\vec{F}_1$  de módulo 10 N é aplicada a uma caixa que está sobre um piso, mas a caixa não se move. Quando o módulo da força vertical  $\vec{F}_2$  aumenta a partir de zero, as grandezas a seguir aumentam, diminuem ou permanecem as mesmas: (a) o módulo da força de atrito estático  $f_s$  a que a caixa está submetida; (b) o módulo da força normal  $\vec{F}_N$  exercida pelo piso sobre a caixa; (c) o valor máximo  $f_{s,\max}$  do módulo da força de atrito estático a que a caixa está submetida? (d) A caixa acaba escorregando?

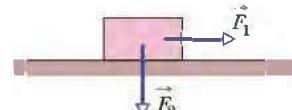


Figura 6-13 Pergunta 3.

**4** Em três experimentos, três forças horizontais diferentes são aplicadas ao mesmo bloco que está sobre a mesma bancada. Os módulos das forças são  $F_1 = 12$  N,  $F_2 = 8$  N e  $F_3 = 4$  N. Em cada experimento, o bloco permanece estacionário, mesmo com a aplicação da força. Ordene as forças, em ordem decrescente, de acordo (a) com o módulo  $f_s$  da força de atrito estático que a bancada exerce sobre o bloco e (b) com o valor máximo  $f_{s,\max}$  dessa força.

**5** Se você pressiona um caixote de maçãs contra uma parede com tanta força que o caixote não escorrega parede abaixo, qual é a orientação (a) da força de atrito estático  $\vec{f}_s$  que a parede exerce sobre o caixote e (b) da força normal  $\vec{F}_N$  que a parede exerce sobre o caixote? Se empurra o caixote com mais força, o que acontece (c) com  $f_s$ , (d) com  $F_N$  e (e) com  $f_{s,\max}$ ?

**6** Na Fig. 6-14, um bloco de massa  $m$  é mantido estacionário sobre uma rampa pela força de atrito que a rampa exerce sobre o bloco.

Uma força  $\vec{F}$ , dirigida para cima ao longo da rampa, é aplicada ao bloco e o módulo da força aumentado gradualmente a partir de zero. Durante esse aumento, o que acontece com a direção e o módulo da força de atrito que age sobre o bloco?

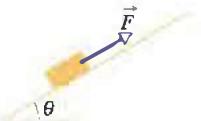


Figura 6-14 Pergunta 6.

**7** Responda à Pergunta 6 se a força  $\vec{F}$  estiver orientada para baixo ao longo da rampa. Quando o módulo de  $\vec{F}$  aumenta a partir de zero, o que acontece com a direção e o módulo da força de atrito que age sobre o bloco?

**8** Na Fig. 6-15, uma força horizontal de 100 N vai ser aplicada a uma prancha de 10 kg, que está inicialmente em repouso sobre um piso liso sem atrito, para acelerar a prancha. Um bloco de 10 kg repousa na superfície da prancha; o coeficiente de atrito  $\mu$  entre o bloco e a prancha não é conhecido e o bloco está solto, podendo escorregar sobre a prancha. (a) Considerando essa possibilidade, qual é o intervalo de valores possíveis para o módulo  $a_p$  da aceleração da prancha? (Sugestão: não é preciso fazer nenhum cálculo complicado; basta considerar valores extremos de  $\mu$ ). (b) Qual é o intervalo de valores possíveis para o módulo  $a_b$  da aceleração do bloco?

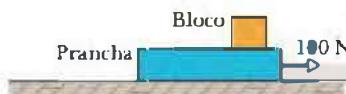


Figura 6-15 Pergunta 8.

**9** A Fig. 6-16 mostra a trajetória de um carrinho de parque de diversões que passa, com velocidade escalar constante, por cinco arcos circulares de raios  $R_1$ ,  $2R_0$  e  $3R_0$ . Ordene os arcos de acordo com o módulo da força centrípeta que age sobre o carrinho ao passar por eles, começando pelo maior.

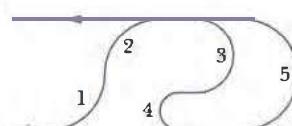


Figura 6-16 Pergunta 9.

**10** Em 1987, para comemorar o dia de Halloween, dois paraquedistas trocaram uma abóbora entre si enquanto estavam em queda livre, a oeste de Chicago. A brincadeira foi muito divertida até que o homem que estava com a abóbora abriu o paraquedas. A abóbora foi arrancada de suas mãos, despencou 0,5 km, atravessou o telhado de uma casa, bateu no chão da cozinha e se espalhou por toda a cozinha recém-reformada. O que fez o paraquedista deixar cair a abóbora, do ponto de vista do paraquedista e do ponto de vista da abóbora?

**11** Uma pessoa que está andando de roda-gigante passa pelas seguintes posições: (1) o ponto mais alto da roda, (2) o ponto mais baixo da roda; (3) o ponto médio da roda. Se a roda está girando com velocidade angular constante, ordene as três posições, em ordem decrescente, de acordo (a) com o módulo da aceleração centrípeta da pessoa; (b) com o módulo da força centrípeta resultante a que a pessoa está sujeita e (c) com o módulo da força normal a que a pessoa está sujeita.

## P R O B L E M A S

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

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

### Seção 6-3 Propriedades do Atrito

•1 O piso de um vagão de trem está carregado de caixas soltas cujo coeficiente de atrito estático com o piso é 0,25. Se o trem está se movendo inicialmente com uma velocidade de 48 km/h, qual é a menor distância na qual o trem pode ser parado com aceleração constante sem que as caixas deslizem no piso?

•2 Em um jogo de *shuffleboard* improvisado, estudantes enlouquecidos pelos exames finais usam uma vassoura para movimentar um livro de cálculo no corredor do dormitório. Se o livro de 3,5 kg adquire uma velocidade de 1,60 m/s ao ser empurrado pela vassoura, a partir do repouso, com uma força horizontal de 25 N, por uma distância de 0,90 m, qual é o coeficiente de atrito cinético entre o livro e o piso?

•3 Uma cômoda com uma massa de 45 kg, incluindo as gavetas e as roupas, está em repouso sobre o piso. (a) Se o coeficiente de atrito estático entre a cômoda e o piso é 0,45, qual é o módulo da menor força horizontal necessária para fazer a cômoda entrar em movimento? (b) Se as gavetas e as roupas, com uma massa total de 17 kg, são removidas antes de empurrar a cômoda, qual é o novo módulo mínimo?

•4 Um porco brincalhão escorreia em uma rampa com uma inclinação de  $35^\circ$  e leva o dobro do tempo que levaria se não houvesse atrito. Qual é o coeficiente de atrito cinético entre o porco e a rampa?

•5 Um bloco de 2,5 kg está inicialmente em repouso em uma superfície horizontal. Uma força horizontal  $\vec{F}$  de módulo 6,0 N e uma força vertical  $\vec{P}$  são aplicadas ao bloco (Fig. 6-17). Os coeficientes de atrito entre o bloco e a superfície são  $\mu_s = 0,40$  e  $\mu_k = 0,25$ . Determine o módulo da força de atrito que age sobre o bloco se o módulo de  $\vec{P}$  é (a) 8,0 N, (b) 10 N e (c) 12 N.

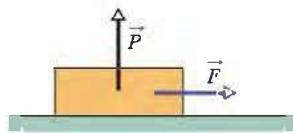


Figura 6-17 Problema 5.

•6 Um jogador de beisebol de massa  $m = 79$  kg, deslizando para chegar à segunda base, é retardado por uma força de atrito de módulo 470 N. Qual é o coeficiente de atrito cinético  $\mu_k$  entre o jogador e o chão?

•7 Uma pessoa empurra horizontalmente um caixote de 55 kg com uma força de 220 N para deslocá-lo em um piso plano. O coeficiente de atrito cinético é 0,35. (a) Qual é o módulo da força de atrito? (b) Qual é o módulo da aceleração do caixote?

•8  As misteriosas pedras que migram. Na remota Racetrack Playa, no Vale da Morte, Califórnia, as pedras às vezes deixam rastros no chão do deserto, como se estivessem migrando (Fig. 6-18). Há muitos anos que os cientistas tentam explicar como as pedras se movem. Uma possível explicação é que, durante uma tempestade ocasional, os fortes ventos arrastam as pedras no solo amolecido pela chuva. Quando o solo seca, os rastros deixados pelas pedras são endurecidos pelo calor. Segundo medições realizadas no local, o coeficiente de atrito cinético entre as pedras e o solo úmido do deserto é aproximadamente 0,80. Qual é a força horizontal necessária para manter em movimento uma pedra de 20 kg (uma massa típica) depois que uma rajada de vento a coloca em movimento? (A história continua no Problema 37.)



Figura 6-18 Problema 8. O que fez a pedra se mover? (Jerry Schad/Photo Researchers)

•9 Um bloco de 3,5 kg é empurrado ao longo de um piso horizontal por uma força  $\vec{F}$  de módulo 15 N que faz um ângulo  $\theta = 40^\circ$  com a horizontal (Figura 6-19). O coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o piso é 0,25. Calcule (a) o módulo da força de atrito que o piso exerce sobre o bloco e (b) o módulo da aceleração do bloco.

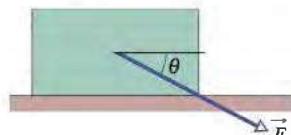
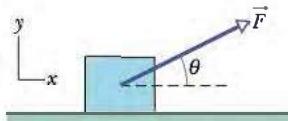


Figura 6-19 Problemas 9 e 32.

•10 A Fig. 6-20 mostra um bloco inicialmente estacionário de massa  $m$  sobre um piso. Uma força de módulo  $0,500 mg$  é aplicada com um ângulo  $\theta = 20^\circ$  para cima. Qual é o módulo da aceleração

do bloco se (a)  $\mu_s = 0,600$  e  $\mu_k = 0,500$  e (b)  $\mu_s = 0,400$  e  $\mu_k = 0,300$ ?



**Figura 6-20** Problema 10.

••11 Um caixote de 68 kg é arrastado sobre um piso, puxado por uma corda inclinada 15° acima da horizontal. (a) Se o coeficiente de atrito estático é 0,50, qual é o valor mínimo do módulo da força para que o caixote comece a se mover? (b) Se  $\mu_s = 0,35$ , qual é o módulo da aceleração inicial do caixote?

••12 Por volta de 1915, Henry Sincosky, da Filadélfia, pendurou-se no caibro de um telhado apertando-o com os polegares de um lado e os outros dedos do outro lado (Fig. 6-21). A massa de Sincosky era 79 kg. Se o coeficiente de atrito estático entre as mãos e o caibro era 0,70, qual foi, no mínimo, o módulo da força normal exercida sobre o caibro pelos polegares ou os dedos do lado oposto? (Depois de se pendurar, Sincosky ergueu o corpo e deslocou-se ao longo do caibro, trocando de mão. Se você não dá valor ao feito de Sincosky, tente repetir a proeza.)



**Figura 6-21** Problema 12.

••13 Um operário empurra um engradado de 35 kg com uma força horizontal de módulo 110 N. O coeficiente de atrito estático entre o engradado e o piso é 0,37. (a) Qual é o valor de  $f_{s,\text{max}}$  nessas circunstâncias? (b) O engradado se move? (c) Qual é a força de atrito que o piso exerce sobre o engradado? (d) Suponha que um segundo operário, no intuito de ajudar, puxe o engradado para cima. Qual é o menor puxão vertical que permite ao primeiro operário mover o engradado com o empurrão de 110 N? (e) Se, em vez disso, o segundo operário tenta ajudar puxando horizontalmente o engradado, qual é o menor puxão que coloca o engradado em movimento?

••14 A Fig. 6-22 mostra a seção transversal de uma estrada na encosta de uma montanha. A reta AA' representa um plano de estratificação ao longo do qual pode ocorrer um deslizamento. O bloco B, situado acima da estrada, está separado do resto da montanha por uma grande fenda (chamada junta), de modo que somente o atrito entre o bloco e o plano de estratificação evita o deslizamento. A massa do bloco é  $1,8 \times 10^7$  kg, o ângulo de mergulho  $\theta$  do

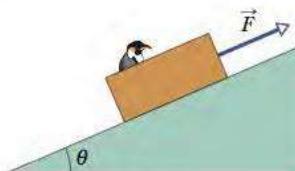
plano de estratificação é 24° e o coeficiente de atrito estático entre o bloco e o plano é 0,63. (a) Mostre que o bloco não desliza. (b) A água penetra na junta e se expande após congelar, exercendo sobre o bloco uma força  $\vec{F}$  paralela a AA'. Qual é o valor mínimo do módulo  $F$  da força para o qual ocorre um deslizamento?



**Figura 6-22** Problema 14.

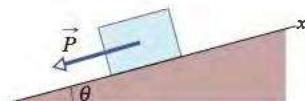
••15 O coeficiente de atrito estático entre o Teflon e ovos mexidos é cerca de 0,04. Qual é o menor ângulo com a horizontal que faz com que os ovos deslizem no fundo de uma frigideira revestida com Teflon?

••16 Um trenó com um pinguim, pesando 80 N, está em repouso sobre uma ladeira de ângulo  $\theta = 20^\circ$  com a horizontal (Fig. 6-23). Entre o trenó e a ladeira, o coeficiente de atrito estático é 0,25 e o coeficiente de atrito cinético é 0,15. (a) Qual é o menor módulo da força  $\vec{F}$ , paralela ao plano, que impede o trenó de deslizar ladeira abaixo? (b) Qual é o menor módulo  $F$  que faz o trenó começar a subir a ladeira? (c) Qual é o valor de  $F$  que faz o trenó subir a ladeira com velocidade constante?



**Figura 6-23** Problemas 16 e 22.

••17 Na Fig. 6-24, uma força  $\vec{P}$  atua sobre um bloco com 45 N de peso. O bloco está inicialmente em repouso sobre um plano inclinado de ângulo  $\theta = 15^\circ$  com a horizontal. O sentido positivo do eixo  $x$  é para cima ao longo do plano. Os coeficientes de atrito entre o bloco e o plano são  $\mu_s = 0,50$  e  $\mu_k = 0,34$ . Em termos dos vetores unitários, qual é a força de atrito exercida pelo plano sobre o bloco quando  $\vec{P}$  é igual a (a)  $(-5,0 \text{ N})\hat{i}$ , (b)  $(-8,0 \text{ N})\hat{i}$  e (c)  $(-15,0 \text{ N})\hat{i}$ ?



**Figura 6-24** Problema 17.

••18 Você depõe como perito em um caso envolvendo um acidente no qual um carro A bateu na traseira de um carro B que estava parado em um sinal vermelho no meio de uma ladeira (Fig. 6-25). Você descobre que a inclinação da ladeira é  $\theta = 12,0^\circ$ , que os carros estavam separados por uma distância  $d = 24,0 \text{ m}$  quando o motorista do carro A freou bruscamente, bloqueando as rodas (o carro não dispunha de freios ABS), e que a velocidade do carro A no momento em que o motorista pisou no freio era  $v_0 = 18 \text{ m/s}$ . Com que velocidade o carro A bateu no carro B se o coeficiente de atrito cinético era (a) 0,60 (estrada seca) e (b) 0,10 (estrada coberta de folhas molhadas)?



Figura 6-25 Problema 18.

- 19** Uma força horizontal  $\vec{F}$  de 12 N empurra um bloco de 5,0 N de peso contra uma parede vertical (Fig. 6-26). O coeficiente de atrito estático entre a parede e o bloco é 0,60 e o coeficiente de atrito cinético é 0,40. Suponha que o bloco não esteja se movendo inicialmente. (a) O bloco vai se mover? (b) Qual é a força que a parede exerce sobre o bloco em termos dos vetores unitários?

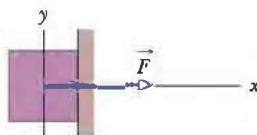


Figura 6-26 Problema 19.

- 20** Na Fig. 6-27, uma caixa de cereais Cheerios (massa  $m_C = 1,0 \text{ kg}$ ) e uma caixa de cereais Wheaties (massa  $m_W = 3,0 \text{ kg}$ ) são aceleradas sobre uma superfície horizontal por uma força horizontal  $\vec{F}$  aplicada à caixa de cereal Cheerios. O módulo da força de atrito que age sobre a caixa de Cheerios é 2,0 N e o módulo da força de atrito que age sobre a caixa de Wheaties é 4,0 N. Se o módulo de  $\vec{F}$  é 12 N, qual é o módulo da força que a caixa de Cheerios exerce sobre a caixa de Wheaties?

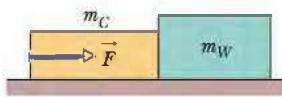


Figura 6-27 Problema 20.

- 21** Uma caixa de areia, inicialmente estacionária, vai ser puxada em um piso por meio de um cabo no qual a tensão não deve exceder 1100 N. O coeficiente de atrito estático entre a caixa e o piso é de 0,35. (a) Qual deve ser o ângulo entre o cabo e a horizontal para que se consiga puxar a maior quantidade possível de areia e (b) qual é o peso da areia e da caixa nesta situação?

- 22** Na Fig. 6-23, um trenó é sustentado em um plano inclinado por uma corda que o puxa para cima paralelamente ao plano. O trenó está na iminência de começar a subir. A Fig. 6-28 mostra o módulo  $F$  da força aplicada à corda em função do coeficiente de atrito estático  $\mu_s$  entre o trenó e o plano. Se  $F_1 = 2,0 \text{ N}$ ,  $F_2 = 5,0 \text{ N}$  e  $\mu_2 = 0,50$ , qual é o valor do ângulo  $\theta$  do plano inclinado?

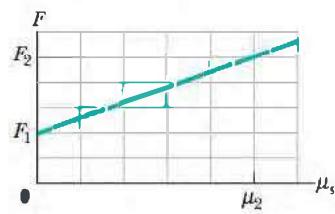


Figura 6-28 Problema 22.

- 23** Quando os três blocos da Fig. 6-29 são liberados a partir do repouso, aceleraram com um módulo de  $0,500 \text{ m/s}^2$ . O bloco 1 tem massa  $M$ , o bloco 2 tem massa  $2M$  e o bloco 3 tem massa  $2M$ . Qual é o coeficiente de atrito cinético entre o bloco 2 e a mesa?

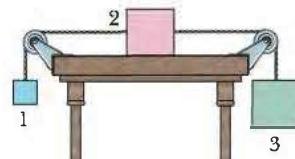


Figura 6-29 Problema 23.

- 24** Um bloco de 4,10 kg é empurrado sobre um piso por uma força horizontal constante de módulo 40,0 N. A Fig. 6-30 mostra a velocidade  $v$  do bloco em função do tempo  $t$  quando o bloco se desloca sobre o piso ao longo de um eixo  $x$ . A escala vertical do gráfico é definida por  $v_s = 5,0 \text{ m/s}$ . Qual é o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o piso?

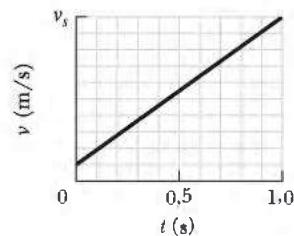


Figura 6-30 Problema 24.

- 25** O bloco  $B$  da Fig. 6-31 pesa 711 N. O coeficiente de atrito estático entre o bloco e a mesa é 0,25; o ângulo  $\theta$  é  $30^\circ$ ; suponha que o trecho da corda entre o bloco  $B$  e o nó é horizontal. Determine o peso máximo do bloco  $A$  para o qual o sistema permanece em repouso.

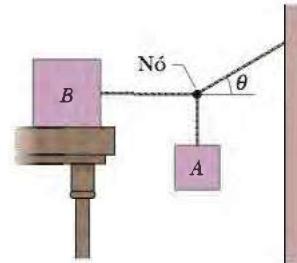


Figura 6-31 Problema 25.

- 26** A Fig. 6-32 mostra três caixotes sendo empurrados sobre um piso de concreto por uma força horizontal  $\vec{F}$  de módulo 440 N. As massas dos caixotes são  $m_1 = 30,0 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 10,0 \text{ kg}$  e  $m_3 = 20,0 \text{ kg}$ . O coeficiente de atrito cinético entre o piso e cada um dos caixotes é de 0,700. (a) Qual é o módulo  $F_{32}$  da força exercida sobre o bloco 3 pelo bloco 2? (b) Se os caixotes deslizassem sobre um piso polido, com um coeficiente de atrito cinético menor que 0,700, o módulo  $F_{32}$  seria maior, menor ou igual ao valor quando o coeficiente de atrito era 0,700?

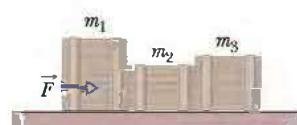


Figura 6-32 Problema 26.

- 27** O bloco  $A$  da Fig. 6-33 pesa 102 N e o bloco  $B$  pesa 32 N. Os coeficientes de atrito entre  $A$  e a rampa são  $\mu_s = 0,56$  e  $\mu_k = 0,25$ . O ângulo  $\theta$  é igual a  $40^\circ$ . Suponha que o eixo  $x$  é paralelo à rampa, com o sentido positivo para cima. Em termos dos vetores unitários, qual é a aceleração de  $A$  se  $A$  está inicialmente (a) em repouso, (b) subindo a rampa e (c) descendo a rampa?

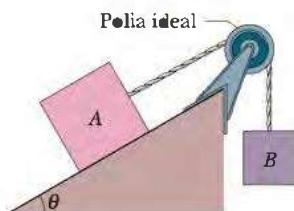


Figura 6-33 Problemas 27 e 28.

**••28** Na Fig. 6-33, dois blocos estão ligados por um fio que passa por uma polia. A massa do bloco  $A$  é 10 kg e o coeficiente de atrito cinético entre  $A$  e a rampa é 0,20. O ângulo  $\theta$  da rampa é  $30^\circ$ . O bloco  $A$  desliza para baixo ao longo da rampa com velocidade constante. Qual é a massa do bloco  $B$ ?

**••29** Na Fig. 6-34, os blocos  $A$  e  $B$  pesam 44 N e 22 N, respectivamente. (a) Determine o menor peso do bloco  $C$  que evita que o bloco  $A$  deslize, se  $\mu_s$  entre  $A$  e a mesa é 0,20. (b) O bloco  $C$  é removido bruscamente de cima do bloco  $A$ . Qual é a aceleração do bloco  $A$  se  $\mu_k$  entre  $A$  e a mesa é 0,15?

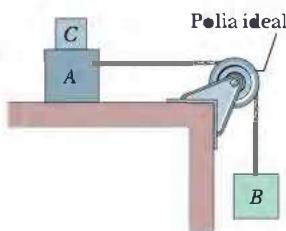


Figura 6-34 Problema 29.

**••30** Uma caixa de brinquedos e seu conteúdo têm um peso total de 180 N. O coeficiente de atrito estático entre a caixa de brinquedos e o piso é 0,42. A criança da Fig. 6-35 tenta arrastar a caixa puxando-a por uma corda. (a) Se  $\theta = 42^\circ$ , qual é o módulo da força  $\vec{F}$  que a criança deve fazer sobre a corda para que a caixa esteja na iminência de se mover? (b) Escreva uma expressão para o menor valor do módulo de  $\vec{F}$  necessário para que a caixa se move em função do ângulo  $\theta$ . Determine (c) o valor de  $\theta$  para o qual  $F$  é mínimo e (d) o valor desse módulo mínimo.

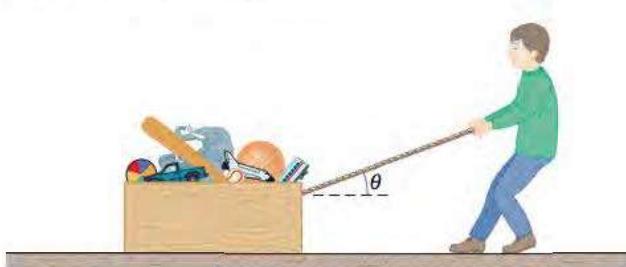


Figura 6-35 Problema 30.

**••31** Dois blocos, com 3,6 N e 7,2 N de peso, estão ligados por uma corda sem massa e deslizam para baixo em um plano inclinado de  $30^\circ$ . O coeficiente de atrito cinético entre o bloco mais leve e o plano é 0,10 e o coeficiente de atrito cinético entre o bloco mais pesado e o plano é 0,20. Supondo que o bloco mais leve desce na frente, determine (a) o módulo da aceleração dos blocos e (b) a tensão da corda.

**••32** Um bloco é empurrado sobre um piso horizontal por uma força constante que é aplicada fazendo um ângulo  $\theta$  para baixo (Fig. 6-19). A Fig. 6-36 mostra o módulo da aceleração  $a$  em função do coeficiente de atrito cinético  $\mu_k$  entre o bloco e o piso. Se  $a_1 = 3,0 \text{ m/s}^2$ ,  $\mu_{k2} = 0,20$  e  $\mu_{k3} = 0,40$ , qual é o valor de  $\theta$ ?

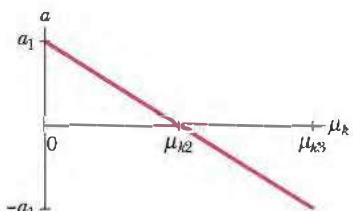


Figura 6-36 Problema 32.

**••33** Um barco de 1000 kg está navegando a  $90 \text{ km/h}$  quando o motor é desligado. O módulo da força de atrito  $\vec{f}_k$  entre o barco e a água é proporcional à velocidade  $v$  do barco:  $f_k = 70v$ , onde  $v$  está em metros por segundo e  $f_k$  em newtons. Determine o tempo necessário para o barco reduzir a velocidade para  $45 \text{ km/h}$ .

**••34** Na Fig. 6-37, uma prancha de massa  $m_1 = 40 \text{ kg}$  repousa em um piso sem atrito e um bloco de massa  $m_2 = 10 \text{ kg}$  repousa sobre a prancha. O coeficiente de atrito estático entre o bloco e a prancha é 0,60 e o coeficiente de atrito cinético é 0,40. O bloco é puxado por uma força horizontal  $\vec{F}$  de módulo 100 N. Em termos dos vetores unitários, qual é a aceleração (a) do bloco e (b) da prancha?

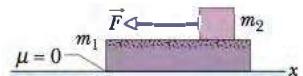


Figura 6-37 Problema 34.

**••35** Os dois blocos ( $m = 16 \text{ kg}$  e  $M = 88 \text{ kg}$ ) da Fig. 6-38 não estão ligados. O coeficiente de atrito estático entre os blocos é  $\mu_s = 0,38$ , mas não há atrito na superfície abaiixo do bloco maior. Qual é o menor valor do módulo da força horizontal  $\vec{F}$  para o qual o bloco menor não escorrega para baixo ao longo do bloco maior?

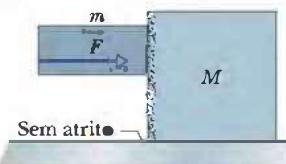


Figura 6-38 Problema 35.

#### Seção 6-4 Força de Arrasto e Velocidade Terminal

**•36** A velocidade terminal de um paraquedista é  $160 \text{ km/h}$  na posição de águia e  $310 \text{ km/h}$  na posição de mergulho de cabeça. Supondo que o coeficiente de arrasto  $C$  do paraquedista não muda de uma posição para outra, determine a razão entre a área da seção reta efetiva  $A$  na posição de menor velocidade e a área na posição de maior velocidade.

**••37** Continuação do Problema 8. Suponha agora que a Eq. 6-14 forneça o módulo da força de arrasto que age sobre uma pedra típica de 20 kg, que apresenta ao vento uma área de seção reta vertical de  $0,040 \text{ m}^2$  e tem um coeficiente de arrasto  $C$  de 0,80. Tome a massa específica do ar como  $1,21 \text{ kg/m}^3$  e o coeficiente de atrito cinético como 0,80. (a) Que velocidade  $V$  de um vento paralelo ao solo, em quilômetros por hora, é necessária para manter a pedra em movimento depois que começa a se mover? Como a velocidade do vento perto do solo é reduzida pela presença do solo, a velocidade do vento informada nos boletins meteorológicos é frequentemente medida a uma altura de 10 m. Suponha que a velocidade do vento a essa altura seja 2,00 vezes maior que junto ao solo. (b) Para a resposta do item a, que velocidade do vento seria informada nos boletins meteorológicos? (c) Esse valor é razoável para um vento

de alta velocidade durante uma tempestade? (A história continua com o Problema 65.)

**••38** Suponha que a Eq. 6-14 forneça a força de arrasto a que estão sujeitos um piloto e o assento de ejeção imediatamente após terem sido ejetados de um avião voando horizontalmente a 1300 km/h. Suponha também que a massa do assento seja igual à massa do piloto e que o coeficiente de arrasto seja o mesmo que o de um paracaidista. Fazendo uma estimativa razoável para a massa do piloto e usando o valor apropriado de  $\rho$ , da Tabela 6-1, estime o módulo (a) da força de arrasto sobre o conjunto piloto + assento e (b) da desaceleração horizontal (em termos de  $g$ ) do conjunto, ambos imediatamente após a ejeção. [O resultado do item (a) deve servir de alerta para os projetistas: o assento precisa dispor de um anteparo para desviar o vento da cabeça do piloto.]

**••39** Calcule a razão entre a força de arrasto experimentada por um avião a jato voando a 1000 km/h a uma altitude de 10 km e a força de arrasto experimentada por um avião a hélice voando a metade da altitude com metade da velocidade. A massa específica do ar é 0,38 kg/m<sup>3</sup> a 10 km e 0,67 kg/m<sup>3</sup> a 5,0 km. Suponha que os aviões possuem a mesma área de seção reta efetiva e o mesmo coeficiente de arrasto  $C$ .

**••40** Ao descer uma encosta, um esquiador é freado pela força de arrasto que o ar exerce sobre o seu corpo e pela força de atrito cinético que a neve exerce sobre os esquis. (a) Suponha que o ângulo da encosta é  $\theta = 40,0^\circ$ , que a neve é neve seca, com um coeficiente de atrito cinético  $\mu_k = 0,0400$ , que a massa do esquiador e seu equipamento é  $m = 85,0$  kg, que a área da seção reta do esquiador (agachado) é  $A = 1,30$  m<sup>2</sup>, que o coeficiente de arrasto é  $C = 0,150$  e que a massa específica do ar é 1,20 kg/m<sup>3</sup>. (a) Qual é a velocidade terminal? (b) Se o esquiador pode fazer o coeficiente de arrasto  $C$  sofrer uma pequena variação  $dC$  alterando, por exemplo, a posição das mãos, qual é a variação correspondente da velocidade terminal?

### Seção 6-5 Movimento Circular Uniforme

**•41** Um gato está cochilando em um carrossel parado, a uma distância de 5,4 m do centro. O brinquedo é ligado e logo atinge a velocidade normal de funcionamento, na qual completa uma volta a cada 6,0 s. Qual deve ser, no mínimo, o coeficiente de atrito estático entre o gato e o carrossel para que o gato permaneça no mesmo lugar, sem escorregar?

**•42** Suponha que o coeficiente de atrito estático entre a estrada e os pneus de um carro é 0,60 e não há sustentação negativa. Que velocidade deixa o carro na iminência de derrapar quando faz uma curva não compensada com 30,5 m de raio?

**•43** Qual é o menor raio de uma curva sem compensação (plana) que permite que um ciclista a 29 km/h faça a curva sem derrapar se o coeficiente de atrito estático entre os pneus e a pista é 0,32?

**•44** Durante uma corrida de trenós nas Olimpíadas de Inverno, a equipe jamaicana fez uma curva de 7,6 m de raio a uma velocidade de 96,6 km/h. Qual foi a aceleração em unidades de  $g$ ?

**•45** Um estudante que pesa 667 N está sentado, com as costas eretas, em uma roda-gigante em movimento. No ponto mais alto, o módulo da força normal  $F_N$  exercida pelo assento sobre o estudante é 556 N. (a) O estudante se sente mais leve ou mais pesado neste ponto? (b) Qual é o módulo de  $F_N$  no ponto mais baixo? Se a velocidade da roda-gigante é duplicada, qual é o módulo  $F_N$  da força normal (c) no ponto mais alto e (d) no ponto mais baixo?

**••46** Uma policial de 55,0 kg, que está perseguindo um suspeito de carro, faz uma curva circular de 300 m de raio a uma velocidade escalar constante de 80 km/h. Determine (a) o módulo e (b) o ângulo (em relação à vertical) da força resultante que a policial exerce sobre o assento do carro. (Sugestão: considere as forças horizontais e verticais.)

**••47** Um viciado em movimentos circulares, com 80 kg de massa, está andando em uma roda-gigante que descreve uma circunferência vertical de 10 m de raio a uma velocidade escalar constante de 6,1 m/s. (a) Qual é o período do movimento? Qual é o módulo da força normal exercida pelo assento sobre o viciado quando a molas passam (b) pelo ponto mais alto da trajetória circular e (c) pelo ponto mais baixo?

**••48** Um carro de montanha-russa tem uma massa de 1200 kg quando está lotado. Quando o carro passa pelo alto de uma elevação circular com 18 m de raio, a velocidade escalar se mantém constante. Nesse instante, quais são (a) o módulo  $F_N$  e (b) o sentido (para cima ou para baixo) da força normal exercida pelo trilho sobre o carro se a velocidade do carro é  $v = 11$  m/s? Quais são (c)  $F_N$  e (d) o sentido da força normal se  $v = 14$  m/s?

**••49** Na Fig. 6-39, um carro passa com velocidade constante por uma colina circular e por um vale circular de mesmo raio. No alto da colina, a força normal exercida sobre o motorista pelo assento do carro é zero. A massa do motorista é de 70,0 kg. Qual é o módulo da força normal exercida pelo assento sobre o motorista quando o carro passa pelo fundo do vale?

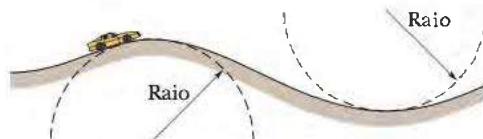


Figura 6-39 Problema 49.

**••50** Um passageiro de 85,0 kg descreve uma trajetória circular de raio  $r = 3,50$  m em movimento circular uniforme (a) A Fig. 6-40a mostra um gráfico do módulo  $F$  da força centrípeta em função da velocidade  $v$  do passageiro. Qual é a inclinação do gráfico para  $v = 8,30$  m/s? (b) A Fig. 6-40b mostra um gráfico do módulo  $F$  da força em função de  $T$ , o período do movimento. Qual é a inclinação do gráfico para  $T = 2,50$  s?

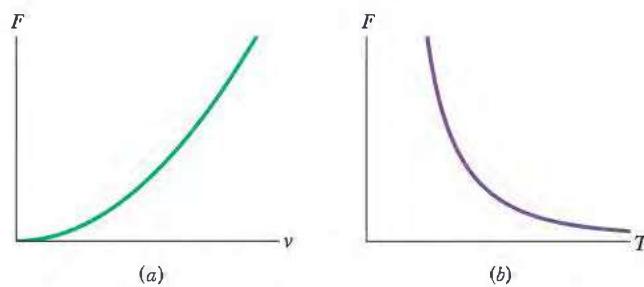


Figura 6-40 Problema 50.

**••51** Um avião está voando em uma circunferência horizontal com uma velocidade de 480 km/h (Fig. 6-41). Se as asas estão inclinadas de um ângulo  $\theta = 40^\circ$  com a horizontal, qual é o raio da circunferência? Suponha que a força necessária para manter o avião nessa trajetória resulte inteiramente de uma "sustentação aerodinâmica" perpendicular à superfície das asas.

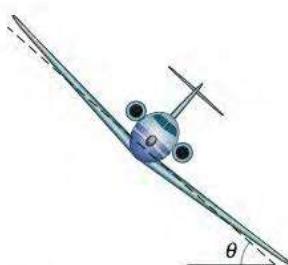


Figura 6-41 Problema 51.

**••52** Em um brinquedo de parque de diversão, um carro se move em uma circunferência vertical na extremidade de uma haste rígida de massa desprezível. O peso do carro com os passageiros é  $5,0 \text{ kN}$  e o raio da circunferência é  $10 \text{ m}$ . No ponto mais alto da circunferência, quais são (a) o módulo  $F_H$  e (b) o sentido (para cima ou para baixo) da força exercida pela haste sobre o carro se a velocidade do carro é  $v = 5,0 \text{ m/s}$ ? Quais são (c)  $F_H$  e (d) o sentido se  $v = 12 \text{ m/s}$ ?

**••53** Um bonde antigo dobra uma esquina fazendo uma curva plana com  $9,1 \text{ m}$  de raio a  $16 \text{ km/h}$ . Qual é o ângulo que as alças de mão penduradas no teto fazem com a vertical?

**••54** Ao projetar brinquedos para parques de diversão que fazem movimentos circulares, os engenheiros mecânicos devem levar em conta o fato de que pequenas variações de certos parâmetros podem alterar significativamente a força experimentada pelos passageiros. Considere um passageiro de massa  $m$  que descreve uma trajetória circular de raio  $r$  com velocidade  $v$ . Determine a variação  $dF$  do módulo da força para (a) uma variação do raio  $r$  da trajetória, sem que  $v$  varie; (b) uma variação  $dv$  da velocidade, sem que  $r$  varie; (c) uma variação  $dT$  do período, sem que  $r$  varie.

**••55** Um parafuso está enroscado em uma das extremidades de uma haste fina horizontal que gira em torno da outra extremidade. Um engenheiro monitora o movimento iluminando o parafuso e a haste com uma lâmpada estroboscópica e ajustando a frequência dos lampejos até que o parafuso pareça estar nas mesmas oito posições a cada rotação completa da haste (Fig. 6-42). A frequência dos lampejos é 2000 flashes por segundo; a massa do parafuso é  $30 \text{ g}$  e a haste tem  $3,5 \text{ cm}$  de comprimento. Qual é o módulo da força exercida pela haste sobre o parafuso?

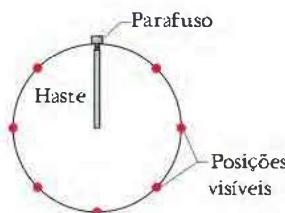


Figura 6-42 Problema 55.

**••56** Uma curva circular compensada de uma rodovia foi planejada para uma velocidade de  $60 \text{ km/h}$ . O raio da curva é  $200 \text{ m}$ . Em um dia chuvoso, a velocidade dos carros diminui para  $40 \text{ km/h}$ . Qual é o menor coeficiente de atrito entre os pneus e a estrada para que os carros façam a curva sem derrapar? (Suponha que os carros não possuem sustentação negativa.)

**••57** Um disco de metal de massa  $m = 1,50 \text{ kg}$  descreve uma circunferência de raio  $r = 20,0 \text{ cm}$  sobre uma mesa sem atrito enquanto permanece ligado a um cilindro de massa  $M = 2,50 \text{ kg}$  pendurado

por um fio que passa por um furo no centro da mesa (Fig. 6-43). Que velocidade do disco mantém o cilindro em repouso?

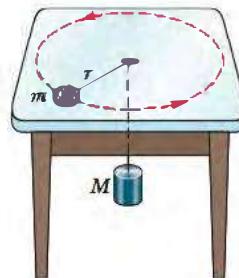


Figura 6-43 Problema 57.

**••58** *Frear ou desviar?* A Fig. 6-44 mostra uma vista superior de um carro que se aproxima de um muro. Suponha que o motorista comece a frear quando a distância entre o carro e o muro é  $d = 107 \text{ m}$ , que a massa do carro é  $m = 1400 \text{ kg}$ , que a velocidade inicial é  $v_0 = 35 \text{ m/s}$  e que o coeficiente de atrito estático é  $\mu_s = 0,50$ . Suponha também que o peso do carro está distribuído igualmente pelas quatro rodas, mesmo durante a frenagem. (a) Qual é o valor mínimo do módulo do atrito estático (entre os pneus e o piso) para que o carro pare antes de se chocar com o muro? (b) Qual é o valor máximo possível do atrito estático  $f_{s,\max}$ ? (c) Se o coeficiente de atrito cinético entre os pneus (com as rodas bloqueadas) e o piso é  $\mu_k = 0,40$ , com que velocidade o carro se choca com o muro? O motorista também pode tentar se desviar do muro, como mostra a figura. (d) Qual é o módulo da força de atrito necessária para fazer o carro descrever uma trajetória circular de raio  $d$  e velocidade  $v_0$ ? (e) A força calculada no item (d) é menor que  $f_{s,\max}$ , o que evitaria o choque?

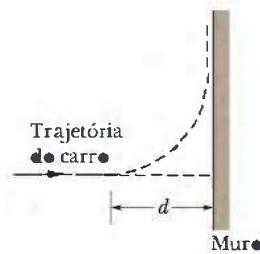


Figura 6-44 Problema 58.

**••59** Na Fig. 6-45, uma bola de  $1,34 \text{ kg}$  é ligada por meio de dois fios de massa desprezível, cada um com comprimento  $L = 1,70 \text{ m}$ , a uma haste vertical giratória. Os fios estão amarrados à haste a uma distância  $d = 1,70 \text{ m}$  um do outro e estão esticados. A tensão do fio de cima é  $35 \text{ N}$ . Determine (a) a tensão do fio de baixo; (b) o módulo da força resultante  $\vec{F}_{\text{res}}$  a que está sujeita a bola; (c) a velocidade escalar da bola; (d) a direção de  $\vec{F}_{\text{res}}$ .

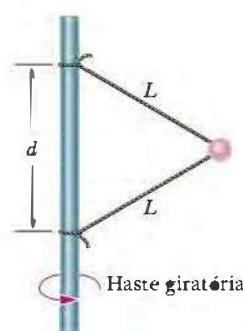
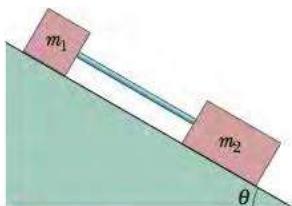


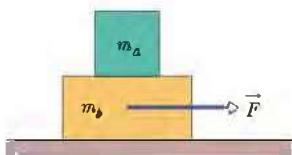
Figura 6-45 Problema 59.

**Problemas Adicionais**

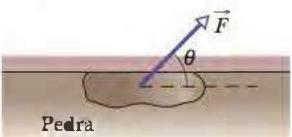
**60** Na Fig. 6-46, uma caixa com formigas vermelhas (massa total  $m_1 = 1,65 \text{ kg}$ ) e uma caixa com formigas pretas (massa total  $m_2 = 3,30 \text{ kg}$ ) deslizam para baixo em um plano inclinado, ligadas por uma haste sem massa paralela ao plano. O ângulo de inclinação é  $\theta = 30,0^\circ$ . O coeficiente de atrito cinético entre a caixa com formigas vermelhas e a rampa é  $\mu_1 = 0,226$ ; entre a caixa com formigas pretas e a rampa é  $\mu_2 = 0,113$ . Calcule (a) a tensão da haste e (b) o módulo da aceleração comum das duas caixas. (c) Como as respostas dos itens (a) e (b) mudariam se as posições das caixas fossem invertidas?

**Figura 6-46** Problema 60.

**61** Um bloco de massa  $m_a = 4,0 \text{ kg}$  é colocado em cima de um outro bloco de massa  $m_b = 5,0 \text{ kg}$ . Para fazer o bloco de cima deslizar sobre o bloco de baixo enquanto o segundo é mantido fixo, é preciso aplicar ao bloco de cima uma força horizontal de no mínimo 12 N. O conjunto de blocos é colocado sobre uma mesa horizontal sem atrito (Fig. 6-47). Determine o módulo (a) da maior força horizontal  $\vec{F}$  que pode ser aplicada ao bloco de baixo sem que os blocos deixem de se mover juntos e (b) a aceleração resultante dos blocos.

**Figura 6-47** Problema 61.

**62** Uma pedra de 5,00 kg é deslocada em contato com o teto horizontal de uma caverna (Fig. 6-48). Se o coeficiente de atrito cinético é 0,65 e a força aplicada à pedra faz um ângulo  $\theta = 70,0^\circ$  para cima com a horizontal, qual deve ser o módulo para que a pedra se move com velocidade constante?

**Figura 6-48** Problema 62.

**63** Na Fig. 6-49, uma alpinista de 49 kg está subindo por uma “chaminé”. O coeficiente de atrito estático entre as botas e a pedra é 1,2; entre as costas e a pedra é 0,80. A alpinista reduziu a força que está fazendo contra a pedra até que se encontra na iminência de escorregar. (a) Desenhe um diagrama de corpo livre da moça. (b) Qual é o módulo da força que a moça exerce contra a pedra? (c) Que fração do peso da moça é sustentada pelo atrito dos sapatos?

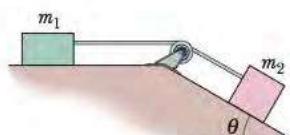
**Figura 6-49** Problema 63.

**64** Um vagão de um trem de alta velocidade faz uma curva horizontal de 470 m de raio, sem compensação, com velocidade constante. Os módulos das componentes horizontal e vertical da força que o vagão exerce sobre um passageiro de 51,0 kg são 210 N e 500 N, respectivamente. (a) Qual é o módulo da força resultante (de todas as forças) sobre o passageiro? (b) Qual é a velocidade do vagão?

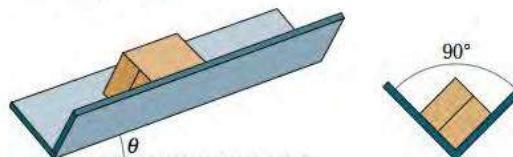
**65** Continuação dos Problemas 8 e 37. Outra explicação é que as pedras se movem apenas quando a água que cai na região durante uma tempestade congela, formando uma fina camada de gelo. As pedras ficam presas no gelo. Quando o vento sopra, o gelo e as pedras são arrastados e as pedras deixam as trilhas. O módulo da força de arrasto do ar sobre esta “vela de gelo” é dado por  $D_{\text{gelo}} = 4C_{\text{gelo}}\rho A_{\text{gelo}}v^2$ , onde  $C_{\text{gelo}}$  é o coeficiente de arrasto ( $2,0 \times 10^{-3}$ ),  $\rho$  é a massa específica do ar ( $1,21 \text{ kg/m}^3$ ),  $A_{\text{gelo}}$  é a área horizontal da camada de gelo e  $v$  a velocidade do vento.

Suponha o seguinte: a camada de gelo mede 400 m por 500 m por 4,0 mm e tem um coeficiente de atrito cinético 0,10 com o solo e uma massa específica de  $917 \text{ kg/m}^3$ . Suponha ainda que 100 pedras iguais às do Problema 8 estão presas no gelo. Qual é a velocidade do vento necessária para manter o movimento da camada de gelo (a) nas proximidades da camada e (b) a uma altura de 10 m? (c) Esses valores são razoáveis para ventos fortes durante uma tempestade?

**66** Na Fig. 6-50, o bloco 1, de massa  $m_1 = 2,0 \text{ kg}$ , e o bloco 2, de massa  $m_2 = 3,0 \text{ kg}$ , estão ligados por um fio de massa desprezível e são inicialmente mantidos em repouso. O bloco 2 está sobre uma superfície sem atrito com uma inclinação  $\theta = 30^\circ$ . O coeficiente de atrito cinético entre o bloco 1 e a superfície horizontal é 0,25. A polia tem massa e atrito desprezíveis. Ao serem liberados, os blocos entram em movimento. Qual é a tensão do fio?

**Figura 6-50** Problema 66.

**67** Na Fig. 6-51, um caixote escorrega para baixo em uma vala inclinada cujos lados fazem um ângulo reto. O coeficiente de atrito cinético entre o caixote e a vala é  $\mu_k$ . Qual é a aceleração do caixote em termos de  $\mu_k$ ,  $\theta$  e  $g$ ?

**Figura 6-51** Problema 67.

**68** *Projetando uma curva de uma rodovia.* Se um carro entra muito depressa em uma curva, tende a derrapar. No caso de uma curva compensada com atrito, a força de atrito que age sobre um carro em alta velocidade se opõe à tendência do carro de derrapar para fora da estrada; a força aponta para o lado mais baixo da pista (o lado para o qual a água escoaria). Considere uma curva circular de raio  $R = 200\text{ m}$  e um ângulo de compensação  $\theta$ , na qual o coeficiente de atrito estático entre os pneus e o pavimento é  $\mu_s$ . Um carro (sem sustentação negativa) começa a fazer a curva, como mostra a Fig. 6-11. (a) Escreva uma expressão para a velocidade do carro  $v_{\text{máx}}$  que o coloca na iminência de derrapar. (b) Plote, no mesmo gráfico,  $v_{\text{máx}}$  em função de  $\theta$  para o intervalo de  $0^\circ$  a  $50^\circ$ , primeiro para  $\mu_s = 0,60$  (pista seca) e depois para  $\mu_s = 0,050$  (pista molhada). Calcule  $v_{\text{máx}}$  em km/h, para um ângulo de compensação  $\theta = 10^\circ$  e para (c)  $\mu_s = 0,60$  e (d)  $\mu_s = 0,050$ . (Agora você pode entender por que ocorrem acidentes nas curvas das estradas quando os motoristas não percebem que a estrada está molhada e continuam dirigindo na velocidade normal.)

**69** Um estudante, enlouquecido pelos exames finais, usa uma força  $\vec{P}$  de módulo  $80\text{ N}$  e ângulo  $\theta = 70^\circ$  para empurrar um bloco de  $5,0\text{ kg}$  no teto do quarto (Fig. 6-52). Se o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o teto é  $0,40$ , qual é o módulo da aceleração do bloco?

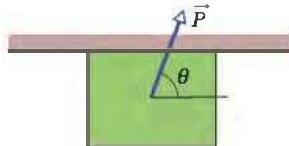


Figura 6-52 Problema 69.

**70** A Fig. 6-53 mostra um *pêndulo cônicos*, no qual um peso (pequeno objeto na extremidade inferior da corda) se move em uma circunferência horizontal com velocidade constante. (A corda descreve um cone quando o peso gira.) O peso tem uma massa de  $0,040\text{ kg}$ , a corda tem um comprimento  $L = 0,90\text{ m}$  e a massa desprezível e o peso descreve uma circunferência de  $0,94\text{ m}$ . Determine (a) a tensão da corda e (b) o período do movimento.

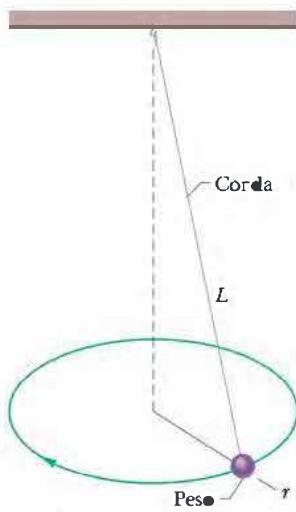


Figura 6-53 Problema 70.

**71** Um bloco de aço de  $8,00\text{ kg}$  repousa em uma mesa horizontal. O coeficiente de atrito estático entre o bloco e a mesa é  $0,450$ . Uma força é aplicada ao bloco. Calcule, com três algarismos significativos, o módulo da força se ela coloca o bloco na iminência de desliza-

zar quando é dirigida (a) horizontalmente, (b) para cima, formando um ângulo de  $60,0^\circ$  com a horizontal e (c) para baixo, formando um ângulo de  $60,0^\circ$  com a horizontal.

**72** Uma caixa de enlatados escorrega em uma rampa do nível da rua até o subsolo de um armazém com uma aceleração de  $0,75\text{ m/s}^2$  dirigida para baixo ao longo da rampa. A rampa faz um ângulo de  $40^\circ$  com a horizontal. Qual é o coeficiente de atrito cinético entre a caixa e a rampa?

**73** Na Fig. 6-54, o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o plano inclinado é  $0,20$  e o ângulo  $\theta$  é  $60^\circ$ . Quais são (a) o módulo  $a$  e (b) o sentido (para cima ou para baixo ao longo do plano) da aceleração do bloco se ele está escorregando para baixo? Quais são (c) o módulo  $a$  e (d) o sentido da aceleração se o bloco estiver escorregando para cima?

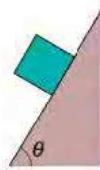


Figura 6-54 Problema 73.

**74** Um disco de metal de  $110\text{ g}$  que desliza sobre o gelo é parado em  $15\text{ m}$  pela força de atrito que o gelo exerce sobre o disco. (a) Se a velocidade inicial do disco é  $60\text{ m/s}$ , qual é o módulo da força de atrito? (b) Qual é o coeficiente de atrito entre o disco e o gelo?

**75** Uma locomotiva acelera um trem de  $25$  vagões em uma linha férrea plana. Cada vagão possui uma massa de  $5,0 \times 10^4\text{ kg}$  e está sujeito a uma força de atrito  $f = 250v$ , onde a velocidade  $v$  está em metros por segundo e a força  $f$  está em newtons. No instante em que a velocidade do trem é  $30\text{ km/h}$ , o módulo da aceleração é  $0,20\text{ m/s}^2$ . (a) Qual é a tensão no engate entre o primeiro vagão e a locomotiva? (b) Se essa tensão é igual à força máxima que a locomotiva pode exercer sobre o trem, qual é o maior aceleração que a linha férrea pode ter para que a locomotiva consiga puxar o trem a  $30\text{ km/h}$ ?

**76** Uma casa é construída no alto de uma colina, perto de uma encosta com uma inclinação  $\theta = 45^\circ$  (Fig. 6-55). Um estudo de engenharia indica que o ângulo do declive deve ser reduzido porque as camadas superiores do solo podem deslizar em relação às camadas inferiores. Se o coeficiente de atrito estático entre essas camadas é  $0,5$ , qual é o menor ângulo  $\phi$  de que a inclinação atual deve ser reduzida para evitar deslizamentos?

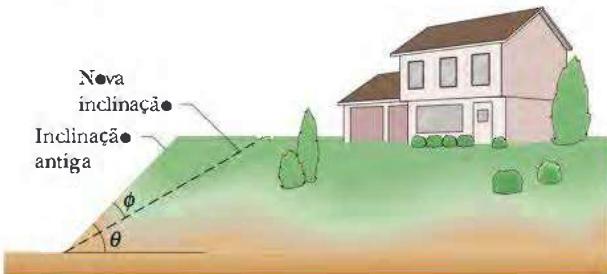


Figura 6-55 Problema 76.

**77** Qual é a velocidade terminal de uma bola esférica de  $6,00\text{ kg}$  que possui um raio de  $3,00\text{ cm}$  e um coeficiente de arrasto de  $1,60$ ? A massa específica do ar no local onde a bola está caindo é  $1,20\text{ kg/m}^3$ .

**78** Uma estudante pretende determinar os coeficientes de atrito estático e atrito cinético entre uma caixa e uma tábua. Para isso, coloca

a caixa sobre a tábua e levanta lentamente uma das extremidades da tábua. Quando o ângulo de inclinação em relação à horizontal chega a  $30^\circ$ , a caixa começa a escorregar e percorre 2,5 m ao longo da tábua em 4,0 s, com aceleração constante. Quais são (a) o coeficiente de atrito estático e (b) o coeficiente de atrito cinético entre a caixa e a tábua?

**79** O bloco A da Fig. 6-56 possui massa  $m_A = 4,0 \text{ kg}$  e o bloco B possui massa  $m_B = 2,0 \text{ kg}$ . O coeficiente de atrito cinético entre o bloco B e o plano horizontal é  $\mu_k = 0,50$ . O ângulo do plano inclinado sem atrito é  $\theta = 30^\circ$ . A polia serve apenas para mudar a direção do fio que liga os blocos. O fio possui massa desprezível. Determine (a) a tensão do fio e (b) o módulo da aceleração dos blocos.

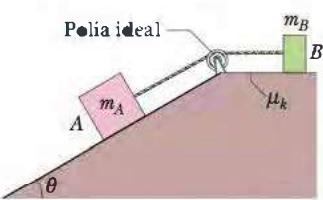


Figura 6-56 Problema 79.

**80** Calcule o módulo da força de arrasto a que está sujeito um míssil de 53 cm de diâmetro voando a 250 m/s em baixa altitude. Suponha que a massa específica do ar é  $1,2 \text{ kg/m}^3$  e o coeficiente de arrasto C é 0,75.

**81** Um ciclista se move em um círculo de 25,0 m de raio com uma velocidade constante de 9,00 m/s. A massa do conjunto ciclista-bicicleta é 85,0 kg. Calcule o módulo (a) da força de atrito que a pista exerce sobre a bicicleta e (b) da força resultante que a pista exerce sobre a bicicleta.

**82** Na Fig. 6-57, um carro (sem sustentação negativa), dirigido por um dublê, passa pelo alto de um morro cuja seção transversal pode ser aproximada por uma circunferência de raio  $R = 250 \text{ m}$ . Qual é a maior velocidade para a qual o carro não perde contato com a estrada no alto do morro?

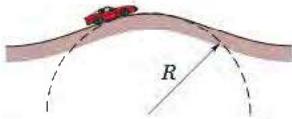


Figura 6-57 Problema 82.

**83** Você precisa empurrar um caixote até um atracadouro. O caixote pesa 165 N. O coeficiente de atrito estático entre o caixote e o piso é 0,510 e o coeficiente de atrito cinético é 0,32. A força que você exerce sobre o caixote é horizontal. (a) Qual deve ser o módulo da força para que o caixote comece a se mover? (b) Qual deve ser o módulo da força, depois que o caixote comece a se mover, para que se move com velocidade constante? (c) Se, depois que o caixote começar a se mover, o módulo da força tiver o valor calculado no item a, qual será o módulo da aceleração do caixote?

**84** Na Fig. 6-58, uma força  $\vec{F}$  é aplicada a um caixote de massa  $m$  que repousa em um piso; o coeficiente de atrito estático entre o caixote e o piso é  $\mu_s$ . O ângulo  $\theta$  é inicialmente  $0^\circ$ , mas é gradualmente aumentado, de modo que a direção da força gira no sentido horário. Durante a rotação, a intensidade da força é continuamente ajustada para que o caixote permaneça na iminência de se mover. Para  $\mu_s = 0,70$ , (a) plote a razão  $F/mg$  em função de  $\theta$  e (b) determine o ângulo  $\theta_{\text{inf}}$  para o qual a razão se torna infinita. (c) Se o piso

é lubrificado, o valor de  $\theta_{\text{inf}}$  aumenta, diminui ou permanece inalterado? (d) Qual é o valor de  $\theta_{\text{inf}}$  para  $\mu_s = 0,60$ ?

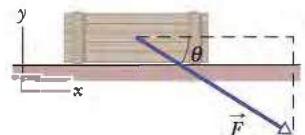


Figura 6-58 Problema 84.

**85** Durante a tarde, um carro é estacionado em uma ladeira que faz um ângulo de  $35,0^\circ$  com a horizontal. Nesse momento, o coeficiente de atrito estático entre os pneus e o asfalto é 0,725. Quando anoitece, começa a nevar e o coeficiente de atrito diminui, tanto por causa da neve como por causa das mudanças químicas do pavimento causadas pela queda de temperatura. Qual deve ser a redução percentual do coeficiente de atrito para que o carro comece a escorregar ladeira abaixo?

**86** Um menino com uma funda coloca uma pedra (0,250 kg) na bolsa (0,010 kg) da funda e faz girar a pedra e a bolsa em uma circunferência vertical de raio 0,650 m. A corda entre a bolsa e a mão do menino tem massa desprezível e arrebentará se a tensão exceder 33,0 N. Suponha que o menino aumente aos poucos a velocidade da pedra. (a) A corda vai arrebentar no ponto mais baixo da circunferência ou no ponto mais alto? (b) Para que valor da velocidade da pedra a corda vai arrebentar?

**87** Um carro com 10,7 kN de peso, viajando a 13,4 m/s sem sustentação negativa, tenta fazer uma curva não compensada com um raio de 61,0 m. (a) Qual é o módulo da força de atrito entre os pneus e a estrada necessária para manter o carro em uma trajetória circular? (b) Se o coeficiente de atrito estático entre os pneus e a estrada é 0,350, o carro consegue fazer a curva sem derrapar?

**88** Na Fig. 6-59, o bloco 1 de massa  $m_1 = 2,0 \text{ kg}$  e o bloco 2 de massa  $m_2 = 1,0 \text{ kg}$  estão ligados por um fio de massa desprezível. O bloco 2 é empurrado por uma força  $\vec{F}$  de módulo 20 N que faz um ângulo  $\theta = 35^\circ$  com a horizontal. O coeficiente de atrito cinético entre cada bloco e a superfície horizontal é 0,20. Qual é a tensão do fio?

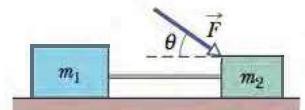
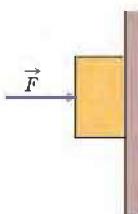


Figura 6-59 Problema 88.

**89** Um pequeno armário com 556 N de peso está em repouso. O coeficiente de atrito estático entre o armário e o piso é 0,68 e o coeficiente de atrito cinético é 0,56. Em quatro diferentes tentativas de deslocá-lo, o armário é empurrado por forças horizontais de módulos (a) 222 N, (b) 334 N, (c) 445 N e (d) 556 N. Para cada tentativa, calcule o módulo da força de atrito exercida pelo piso sobre o armário. (Em cada tentativa, o armário está inicialmente em repouso.) (e) Em quais das tentativas o armário se move?

**90** Na Fig. 6-60, um bloco com 22 N de peso é mantido em repouso contra uma parede vertical por uma força horizontal  $\vec{F}$  de módulo 60 N. O coeficiente de atrito estático entre a parede e o bloco é 0,55 e o coeficiente de atrito cinético é 0,38. Em seis experimentos, uma segunda força  $\vec{P}$  é aplicada ao bloco, paralelamente à parede, com os seguintes módulos e sentidos: (a) 34 N para cima, (b) 12 N para cima, (c) 48 N para cima, (d) 62 N para cima, (e) 10 N para baixo e (f) 18 N para baixo. Qual é o módulo da força de atrito que age sobre o bloco em cada experimento? Em que experimentos o bloco

se move (g) para cima e (h) para baixo? (i) Em que experimentos a força de atrito é para baixo?



**Figura 6-60** Problema 90.

**91** Um bloco escorrega para baixo com velocidade constante em um plano inclinado de ângulo  $\theta$ . Em seguida, o bloco é lançado para cima no mesmo plano com velocidade inicial  $v_0$ . (a) Que distância o bloco sobe até parar? (b) Depois de parar, o bloco torna a escorregar para baixo? Justifique sua resposta.

**92** Uma curva circular em uma rodovia é projetada para uma velocidade máxima de 60 km/h. Suponha que os carros não possuem sustentação negativa. (a) Se o raio da curva é 150 m, qual é o ângulo de compensação correto? (b) Se a curva não fosse compensada, qual deveria ser o menor coeficiente de atrito entre os pneus e o piso para que os carros não derrapassem ao entrarem na curva a 60 km/h?

**93** Uma caixa de 1,5 kg está em repouso sobre uma superfície quando, em  $t = 0$ , uma força horizontal  $\vec{F} = (1,8t)\hat{i}$  N (com  $t$  em segundos) é aplicada à caixa. A aceleração da caixa em função do tempo  $t$  é dada por  $\vec{a} = 0$  para  $0 \leq t \leq 2,8$  s e  $\vec{a} = (1,2t - 2,4)\hat{i}$  m/s<sup>2</sup> para  $t > 2,8$  s. (a) Qual é o coeficiente de atrito estático entre a caixa e a superfície? (b) Qual é o coeficiente de atrito cinético entre a caixa e a superfície?

**94** Uma criança com 140 N de peso está sentada no alto de um escorregador que faz um ângulo de 25° com a horizontal. A criança se mantém no mesmo lugar segurando os lados do escorregador. Quando solta as mãos, adquire uma aceleração constante de 0,86 m/s<sup>2</sup> (dirigida para baixo, naturalmente). Qual é o coeficiente de atrito cinético entre a criança e o escorregador? (b) Que valores máximo e mínimo do coeficiente de atrito estático entre a criança e o escorregador são compatíveis com as informações do enunciado?

**95** Na Fig. 6-61, um faxineiro caprichoso limpa o piso aplicando ao cabo do esfregão uma força  $\vec{F}$ . O cabo faz um ângulo  $\theta$  com a vertical e  $\mu_s$  e  $\mu_k$  são os coeficientes de atrito estático e cinético entre o esfregão e o piso. Ignore a massa do cabo e suponha que toda a massa  $m$  do esfregão está concentrada no pano de chão. (a) Se o pano de chão se move ao longo do piso com velocidade constante,

qual é o valor de  $F$ ? (b) Mostre que se  $\theta$  for menor que um certo valor  $\theta_0$ , a força  $\vec{F}$  (ainda orientada ao longo do cabo) será insuficiente para fazer o pano de chão se mover. Determine  $\theta_0$ .

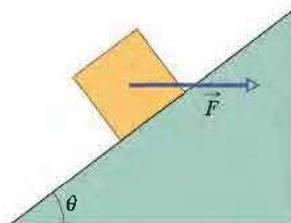


**Figura 6-61** Problema 95.

**96** Uma criança coloca uma cesta de piquenique na borda de um carrossel com 4,6 m de raio que dá uma volta completa a cada 30 s. (a) Qual é a velocidade de um ponto da borda do carrossel? (b) Qual é o menor valor do coeficiente de atrito estático entre a cesta e o carrossel para que a cesta não saia do lugar?

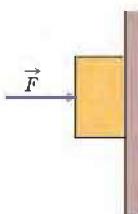
**97** Um operário aplica uma força constante de módulo 85 N a uma caixa de 40 kg que está inicialmente em repouso no piso horizontal de um armazém. Após a caixa ter percorrido uma distância de 1,4 m, sua velocidade é 1,0 m/s. Qual é o coeficiente de atrito cinético entre a caixa e o piso?

**98** Na Fig. 6-62, um bloco de 5,0 kg se move para cima ao longo de um plano inclinado de ângulo  $\theta = 37^\circ$  ao mesmo tempo em que sofre a ação de uma força horizontal  $\vec{F}$  de módulo 50 N. O coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o plano é 0,30. Quais são (a) o módulo e (b) o sentido (para cima ou para baixo ao longo do plano inclinado) da aceleração do bloco? A velocidade inicial do bloco é 4,0 m/s. (c) Que distância o bloco sobe no plano? (d) Depois de atingir o ponto mais alto, o bloco permanece em repouso ou escorrega para baixo?



**Figura 6-62** Problema 98.

se move (g) para cima e (h) para baixo? (i) Em que experimentos a força de atrito é para baixo?



**Figura 6-60** Problema 90.

**91** Um bloco escorrega para baixo com velocidade constante em um plano inclinado de ângulo  $\theta$ . Em seguida, o bloco é lançado para cima no mesmo plano com velocidade inicial  $v_0$ . (a) Que distância o bloco sobe até parar? (b) Depois de parar, o bloco torna a escorregar para baixo? Justifique sua resposta.

**92** Uma curva circular em uma rodovia é projetada para uma velocidade máxima de 60 km/h. Suponha que os carros não possuem sustentação negativa. (a) Se o raio da curva é 150 m, qual é o ângulo de compensação correto? (b) Se a curva não fosse compensada, qual deveria ser o menor coeficiente de atrito entre os pneus e o piso para que os carros não derrapassem ao entrarem na curva a 60 km/h?

**93** Uma caixa de 1,5 kg está em repouso sobre uma superfície quando, em  $t = 0$ , uma força horizontal  $\vec{F} = (1,8t)\hat{i}$  N (com  $t$  em segundos) é aplicada à caixa. A aceleração da caixa em função do tempo  $t$  é dada por  $\vec{a} = 0$  para  $0 \leq t \leq 2,8$  s e  $\vec{a} = (1,2t - 2,4)\hat{i}$  m/s<sup>2</sup> para  $t > 2,8$  s. (a) Qual é o coeficiente de atrito estático entre a caixa e a superfície? (b) Qual é o coeficiente de atrito cinético entre a caixa e a superfície?

**94** Uma criança com 140 N de peso está sentada no alto de um escorregador que faz um ângulo de 25° com a horizontal. A criança se mantém no mesmo lugar segurando os lados do escorregador. Quando solta as mãos, adquire uma aceleração constante de 0,86 m/s<sup>2</sup> (dirigida para baixo, naturalmente). Qual é o coeficiente de atrito cinético entre a criança e o escorregador? (b) Que valores máximo e mínimo do coeficiente de atrito estático entre a criança e o escorregador são compatíveis com as informações do enunciado?

**95** Na Fig. 6-61, um faxineiro caprichoso limpa o piso aplicando ao cabo do esfregão uma força  $\vec{F}$ . O cabo faz um ângulo  $\theta$  com a vertical e  $\mu_s$  e  $\mu_k$  são os coeficientes de atrito estático e cinético entre o esfregão e o piso. Ignore a massa do cabo e suponha que toda a massa  $m$  do esfregão está concentrada no pano de chão. (a) Se o pano de chão se move ao longo do piso com velocidade constante,

qual é o valor de  $F$ ? (b) Mostre que se  $\theta$  for menor que um certo valor  $\theta_0$ , a força  $\vec{F}$  (ainda orientada ao longo do cabo) será insuficiente para fazer o pano de chão se mover. Determine  $\theta_0$ .

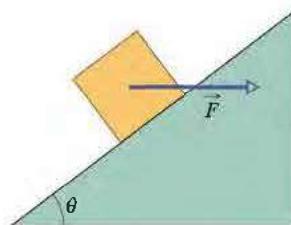


**Figura 6-61** Problema 95.

**96** Uma criança coloca uma cesta de piquenique na borda de um carrossel com 4,6 m de raio que dá uma volta completa a cada 30 s. (a) Qual é a velocidade de um ponto da borda do carrossel? (b) Qual é o menor valor do coeficiente de atrito estático entre a cesta e o carrossel para que a cesta não saia do lugar?

**97** Um operário aplica uma força constante de módulo 85 N a uma caixa de 40 kg que está inicialmente em repouso no piso horizontal de um armazém. Após a caixa ter percorrido uma distância de 1,4 m, sua velocidade é 1,0 m/s. Qual é o coeficiente de atrito cinético entre a caixa e o piso?

**98** Na Fig. 6-62, um bloco de 5,0 kg se move para cima ao longo de um plano inclinado de ângulo  $\theta = 37^\circ$  ao mesmo tempo em que sofre a ação de uma força horizontal  $\vec{F}$  de módulo 50 N. O coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o plano é 0,30. Quais são (a) o módulo e (b) o sentido (para cima ou para baixo ao longo do plano inclinado) da aceleração do bloco? A velocidade inicial do bloco é 4,0 m/s. (c) Que distância o bloco sobe no plano? (d) Depois de atingir o ponto mais alto, o bloco permanece em repouso ou escorregendo para baixo?



**Figura 6-62** Problema 98.