Capítulo 6

1. Para evitar que as caixas deslizem, é preciso que a desaceleração a seja menor ou igual à força máxima de atrito (Eq. 6-1, com $F_N = mg$ neste caso). De acordo com a Segunda Lei de Newton, temos:

$$a = f_{s,\max}/m = \mu_s g\,.$$

A distância pode ser calculada com o auxílio da Eq. 2-16: $x - x_0 = v^2/2a = 36$ m. Antes de realizar este cálculo, é preciso converter a velocidade de 48 km/h para 13 m/s.

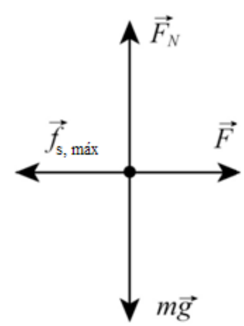
2. Aplicando a Segunda Lei de Newton ao movimento horizontal, temos $F - \mu_k mg = ma$, em que usamos a Eq. 6-2, supondo que $F_N = mg$ (o que equivale a desprezar a força vertical exercida pela vassoura). A Eq. 2-16 relaciona a distância percorrida à velocidade final e à aceleração: $v^2 = 2a(x - x_0)$. Substituindo os valores conhecidos de v e $(x - x_0)$, obtemos $a = 1{,}4$ m/s^2. Voltando à equação da força, obtemos (para $F = 25$ N e $m = 3{,}5$ kg) um valor para o coeficiente de atrito cinético $\mu_k = 0{,}58$.

3. PENSE Como existe atrito entre a cômoda e o piso, a cômoda só começa a se mover se a força horizontal aplicada for maior que um determinado valor.

FORMULE A figura mostra o diagrama de corpo livre da cômoda. Vamos chamar de $\vec{F}$ a força horizontal aplicada à cômoda, de $\vec{f}_s$ a força de atrito estático, de $\vec{F}_N$ a força normal exercida pelo piso, e de $m\vec{g}$ a força gravitacional. Aplicando a segunda lei de Newton às componentes x e y do movimento, obtemos as equações

$$\begin{aligned} F - f_{s,\,\text{máx}} &= ma \\ F_N - mg &= 0 \end{aligned}$$

respectivamente.



A segunda equação nos dá a força normal $F_N = mg$. Como, de acordo com a Eq. 6-1, $f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N$, a primeira equação se torna

$$F - \mu_s mg = ma = 0$$

em que fizemos $a = 0$ para levar em conta o fato de que a força de atrito estático ainda é capaz de equilibrar a força aplicada, embora esteja prestes a ser superada.

ANALISE (a) Para $\mu_s = 0{,}45$ e $m = 45$ kg, a equação anterior nos dá

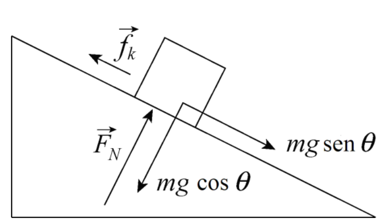
$$F = \mu_s mg = (0{,}45)(45\,\text{kg})(9{,}8\,\text{m/s}^2) = 198\,\text{N}$$

Para colocar a cômoda em movimento, é preciso aplicar uma força horizontal maior que esse valor. Arredondando para dois algarismos significativos, podemos dizer que a força mínima necessária para fazer a cômoda entrar em movimento é $F = 2{,}0 \times 10^2$ N.

(b) Substituindo $m = 45$ kg por $m = 45 - 17 = 28$ kg, obtemos $F = 1{,}2 \times 10^2$ N, o mesmo raciocínio do item (a).

APRENDA Os valores aqui calculados representam a força mínima necessária para vencer o atrito estático. Uma vez vencido o atrito estático, o corpo entrará em movimento e a força de atrito passará a ser a força de atrito cinético, que é menor que a força de atrito estático. Assim, se o valor da força aplicada permanecer o mesmo, o corpo sofrerá aceleração.

4. O diagrama a seguir mostra as forças que agem sobre o porco. O ângulo de inclinação da rampa é θ.



Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y, temos:

$$mg\,\text{sen}\,\theta - f_k = ma$$
$$F_N - mg\cos\theta = 0.$$

Resolvendo esse sistema de equações e usando a Eq. 6-2 ($f_k = \mu_k F_N$), temos:

$$a = g\left(\text{sen}\,\theta - \mu_k \cos\theta\right).$$

Para calcular o tempo que o porco leva para percorrer uma distância ℓ, usamos a Eq. 2-15:

$$\ell = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \quad \Rightarrow \quad t = \sqrt{\frac{2\ell}{a}}.$$

Chamando de t' o tempo que o porco leva para percorrer a mesma distância ℓ em uma rampa sem atrito e de a' a aceleração correspondente, temos:

$$\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{2\ell/a}}{\sqrt{2\ell/a'}} = \sqrt{\frac{a'}{a}}$$

o que nos leva a concluir que se $t/t' = 2$, $a' = 4a$. Como, de acordo com a Segunda Lei de Newton, $a' = g\,\text{sen}\,\theta$, temos:

$$g\,\text{sen}\,\theta = 4g\left(\text{sen}\,\theta - \mu_k \cos\theta\right).$$

Resolvendo a equação acima para $\theta = 35°$, obtemos $\mu_k = 0{,}53$.

5. Além das forças mostradas na Fig. 6-17, um diagrama de corpo livre incluiria uma força normal para cima $\vec{F}_N$ exercida pela superfície sobre o bloco, uma força gravitacional $m\vec{g}$ para baixo exercida pela Terra sobre o bloco, e uma força de atrito cinético ou estático horizontal $\vec{f}$. Escolhemos o sentido do eixo x como positivo para a direita e o do eixo y como positivo para cima. Aplicando a Segunda Lei de Newton a esses eixos, obtemos:

$$F - f = ma$$
$$P + F_N - mg = 0$$

em que $F = 6{,}0$ N e $m = 2{,}5$ kg é a massa do bloco.

(a) Nesse caso, $P = 8{,}0$ N e

$$F_N = (2{,}5\ \text{kg})(9{,}8\ \text{m/s}^2) - 8{,}0\ \text{N} = 16{,}5\ \text{N}.$$

De acordo com a Eq. 6-1, isso significa que $f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N = 6{,}6\ \text{N}$, que é maior que a força de 6,0 N para a direita. Assim, o bloco, que estava inicialmente em repouso, permanece em repouso. Fazendo $a = 0$ na primeira equação, obtemos uma força de atrito estático $f = P = 6{,}0$ N.

(b) Nesse caso, $P = 10$ N e

$$F_N = (2{,}5\ \text{kg})(9{,}8\ \text{m/s}^2) - 10\ \text{N} = 14{,}5\ \text{N}.$$

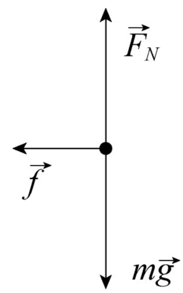
De acordo com a Eq. 6-1, isso significa que $f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N = 5{,}8\ \text{N}$, que é menor que a força de 6,0 N para a direita. Assim, o bloco entra em movimento e passamos a ter um atrito cinético entre o bloco e a superfície, que, de acordo com a Eq. 6-2, é dado por

$$f_k = \mu_k F_N = 3{,}6\ \text{N}.$$

(c) Nesse caso, $P = 12$ N, $F_N = 12{,}5$ N e $f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N = 5{,}0\ \text{N}$, que, como era de se esperar, é menor que a força de 6,0 N para a direita. Assim, o bloco entra em movimento e a força de atrito cinético é $f_k = \mu_k F_N = 3{,}1\ \text{N}$.

6. A figura mostra o diagrama de corpo livre do jogador. $\vec{F}_N$ é a força normal que o campo exerce sobre o jogador, $m\vec{g}$ é a força da gravidade e $\vec{f}$ é a força de atrito. A força de atrito está relacionada à força normal através da equação $f = \mu_k F_N$. Usamos a Segunda Lei de Newton, aplicada ao eixo vertical, para determinar a força normal. Como a componente vertical da aceleração é zero, $F_N - mg = 0$ e $F_N = mg$. Assim,

$$\mu_k = \frac{f}{F_N} = \frac{470\text{ N}}{(79\text{ kg})(9{,}8\text{ m/s}^2)} = 0{,}61.$$

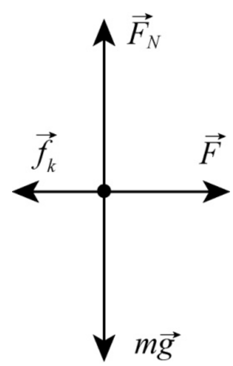


7. PENSE Uma força está sendo usada para acelerar um caixote na presença de atrito. Podemos usar a segunda lei de Newton para calcular a aceleração.

FORMULE A figura mostra o diagrama de corpo livre do caixote. Vamos chamar de $\vec{F}$ a força horizontal que a pessoa exerce sobre o caixote, de $\vec{f}_k$ a força de atrito cinético, de F_N a força normal exercida pelo piso, e de $m\vec{g}$ a força gravitacional. O módulo da força de atrito é dado pela Eq. 6-2: $f_k = \mu_k F_N$. Aplicando a segunda lei de Newton às componentes x e y do movimento, obtemos as equações

$$F - f_k = ma$$
$$F_N - mg = 0$$

respectivamente.



ANALISE (a) Como, de acordo com a segunda equação, a força normal é $F_N = mg$, a força de atrito cinético é

$$f_k = \mu_k F_N = \mu_k mg = (0{,}35)(55\text{ kg})(9{,}8\text{ m/s}^2) = 1{,}9 \times 10^2\text{ N}$$

(b) Substituindo f_k pelo seu valor na primeira equação, obtemos

$$F - \mu_k mg = ma$$

o que nos dá

$$a = \frac{F}{m} - \mu_k g = \frac{220\text{ N}}{55\text{ kg}} - (0{,}35)(9{,}8\text{ m/s}^2) = 0{,}56\text{ m/s}^2$$

APRENDA Para que o caixote seja acelerado, a condição $F > f_k = \mu_k mg$ deve ser satisfeita. Como mostra a equação anterior, para a mesma força aplicada, quanto maior o valor de μ_k, menor a aceleração.

8. Para manter a pedra em movimento, é preciso que exista uma força horizontal (no sentido $+x$) para cancelar o efeito do atrito cinético. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y, temos:

$$F - f_k = ma$$
$$F_N - mg = 0$$

A segunda equação nos dá $F_N = mg$, de modo que, de acordo com a Eq. 6-2, $f_k = \mu_k mg$. Assim, a primeira equação se torna

$$F - \mu_k mg = ma = 0$$

em que fizemos $a = 0$ porque estamos supondo que a velocidade horizontal da pedra é constante. Para $m = 20$ kg e $\mu_k = 0{,}80$, obtemos $F = 1{,}6 \times 10^2$ N.

9. Escolhemos um eixo $+x$ horizontal para a direita, um eixo $+y$ vertical para cima e observamos que as componentes da força aplicada são $F_x = F\cos\theta$ e $F_y = -F\,\text{sen}\,\theta$.

(a) Aplicando a Segunda Lei de Newton ao eixo y, temos:

$$F_N - F\,\text{sen}\,\theta - mg = 0 \;\Rightarrow\; F_N = (15\text{ N})\,\text{sen}\,40^\circ + (3{,}5\text{ kg})(9{,}8\text{ m/s}^2) = 44\text{ N}.$$

Para $\mu_k = 0{,}25$, a Eq. 6-2 nos dá $f_k = 11$ N.

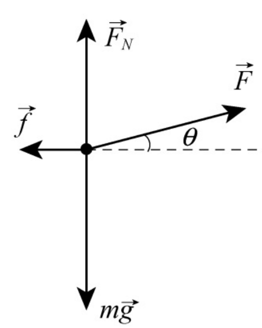
(b) Aplicando a Segunda Lei de Newton ao eixo x, temos:

$$F\cos\theta - f_k = ma \;\Rightarrow\; a = \frac{(15\text{ N})\cos 40^\circ - 11\text{ N}}{3{,}5\text{ kg}} = 0{,}14\text{ m/s}^2$$

Como o resultado é positivo, o bloco acelera para a direita.

10. (a) O diagrama de corpo livre do bloco é mostrado na figura a seguir, em que $\vec{F}$ é a força aplicada, $\vec{F}_N$ é a força normal, $m\vec{g}$ é a força da gravidade e $\vec{f}$ é a força de atrito. Escolhemos um eixo $+x$ horizontal para a direita e um eixo $+y$ vertical para cima. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y, temos:

$$F_x = F\cos\theta - f = ma$$
$$F_y = F\,\text{sen}\,\theta + F_N - mg = 0$$



Como $f = \mu_k F_N$, e a segunda equação nos dá $F_N = mg - F\,\text{sen}\,\theta$, $f = \mu_k(mg - F\text{sen}\theta)$. Substituindo f por essa expressão na primeira equação, obtemos

$$F\cos\theta - \mu_k(mg - F\,\text{sen}\,\theta) = ma,$$

e, portanto,

$$a = \frac{F}{m}(\cos\theta + \mu_k\,\text{sen}\,\theta) - \mu_k g.$$

(a) Para $\mu_s = 0{,}600$ e $\mu_k = 0{,}500$, o módulo de $\vec{f}$ tem um valor máximo

$$f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N = (0{,}600)(mg - 0{,}500mg\,\text{sen}\,20^\circ) = 0{,}497mg.$$

Por outro lado, $F\cos\theta = 0{,}500mg\cos 20° = 0{,}470mg$. Assim, $F\cos\theta < f_{s,\max}$ e o bloco permanece parado.

(b) Para $\mu_s = 0{,}400$ e $\mu_k = 0{,}300$, o módulo de $\vec{f}$ tem um valor máximo

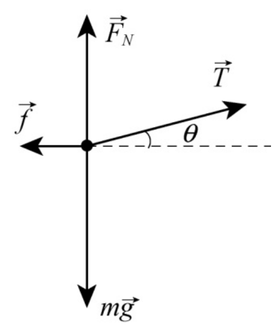
$$f_{s,\,\text{máx}} = \mu_s F_N = (0{,}400)(mg - 0{,}500mg\,\text{sen}\,20°) = 0{,}332mg.$$

Nesse caso, $F\cos\theta = 0{,}500mg\cos 20° = 0{,}470mg > f_{s,\text{máx}}$. Assim, o bloco sofre uma aceleração dada por

$$\begin{aligned} a &= \frac{F}{m}(\cos\theta + \mu_k\,\text{sen}\,\theta) - \mu_k g \\ &= (0{,}500)(9{,}80\ \text{m/s}^2)[\cos 20° + (0{,}300)\,\text{sen}\,20°] - (0{,}300)(9{,}80\ \text{m/s}^2) \\ &= 2{,}17\ \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

11. PENSE Como o caixote está sendo submetido a uma força que não é horizontal nem vertical, precisamos analisar o movimento ao longo dos eixos x e y.

FORMULE A figura mostra o diagrama de corpo livre do caixote, em que $\vec{T}$ é a força exercida pela corda, $\vec{F}_N$ é a força normal, $m\vec{g}$ é a força gravitacional e $\vec{f}$ é a força de atrito. Vamos tomar o sentido positivo do eixo x como para a direita e o sentido positivo do eixo y como para cima. Vamos supor também que o caixote está inicialmente em repouso.



Aplicando a segunda lei de Newton às componentes x e y do movimento, obtemos, respectivamente,

$$T\cos\theta - f = 0, \quad T\,\text{sen}\,\theta + F_N - mg = 0$$

em que θ é o ângulo entre a corda e a horizontal. A primeira equação nos dá $f = T\cos\theta$ e a segunda equação nos dá $F_N = mg - T\,\text{sen}\,\theta$. Para que o caixote permaneça em repouso, devemos ter $f < \mu_s F_N$, ou seja, $T\cos\theta < \mu_s(mg - T\,\text{sen}\,\theta)$. Quando a força aplicada pela corda está prestes a colocar o caixote em movimento, $T\cos\theta = \mu_s(mg - T\,\text{sen}\,\theta)$.

ANALISE (a) Explicitando a tração da corda na equação anterior, obtemos

$$T = \frac{\mu_s mg}{\cos\theta + \mu_s\,\text{sen}\,\theta} = \frac{(0{,}50)\,(68\ \text{kg})\,(9{,}8\ \text{m/s}^2)}{\cos 15° + 0{,}50\,\text{sen}\,15°} = 304\ \text{N} \approx 3{,}0\times10^2\ \text{N}$$

(b) As equações da segunda lei de Newton para o caso do caixote em movimento são

$$T\cos\theta - f = ma, \quad T\,\text{sen}\,\theta + F_N - mg = 0$$

Uma vez que $f = \mu_k F_N$, e a segunda equação nos dá $F_N = mg - T\,\text{sen}\,\theta$, a força de atrito é fornecida por $f = \mu_k(mg - T\,\text{sen}\,\theta)$. Substituindo f pelo seu valor na primeira equação, obtemos

$$T\cos\theta - \mu_k(mg - T\,\text{sen}\,\theta) = ma,$$

e, portanto, a aceleração é

$$\begin{aligned} a &= \frac{T(\cos\theta + \mu_k\,\text{sen}\,\theta)}{m} - \mu_k g \\ &= \frac{(304\ \text{N})(\cos 15° + 0{,}35\,\text{sen}\,15°)}{68\ \text{kg}} - (0{,}35)(9{,}8\ \text{m/s}^2) = 1{,}3\ \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

APRENDA Fazendo θ = 0 nessa equação, obtemos as expressões já conhecidas para uma força horizontal, $T = \mu_s mg$ e $a = (T - \mu_k mg)/m$.

12. Como não há aceleração, a soma das forças de atrito estático (que são quatro, uma para cada polegar e uma para cada conjunto dos outros quatro dedos) é igual à força da gravidade. Assim, de acordo com a Eq. 6-1, temos:

$$4\mu_s F_N = mg = (79 \text{ kg})(9{,}8 \text{ m/s}^2)$$

que, para μ_s = 0,70, nos dá $F_N = 2{,}8 \times 10^2$ N.

13. Chamamos de F o módulo da força exercida pelo operário. O módulo da força de atrito estático pode variar de 0 a $f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N$.

(a) Nesse caso, aplicando a Segunda Lei de Newton na direção vertical, temos $F_N = mg$. Assim,

$$f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N = \mu_s mg = (0{,}37)(35 \text{ kg})(9{,}8 \text{ m/s}^2) = 127 \text{ N}.$$

(b) O engradado não se move, já que F = 110 N < $f_{s,\text{máx}}$ = 127 N.

(c) Aplicando a Segunda Lei de Newton na direção horizontal, temos $f_s = F$ = 110 N.

(d) Chamando a força para cima exercida pelo segundo operário de F_2 e aplicando a Segunda Lei de Newton na direção vertical, obtemos $F_N = mg - F_2$, o que nos dá

$$f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N = \mu_s (mg - F_2)\,.$$

Para que o engradado se mova, F deve satisfazer a condição $F > f_{s,\text{máx}} = \mu_s (mg - F_2)$ o que nos dá

$$110 \text{ N} > (0{,}37)\left[(35 \text{ kg})(9{,}8 \text{ m/s}^2) - F_2\right].$$

Como o menor valor de F_2 que satisfaz essa desigualdade é um valor ligeiramente maior que 45,7 N, podemos dizer que $F_{2,\text{mín}}$ = 46 N.

(e) Nesse caso, a força horizontal total tem que ser maior que o valor de $f_{s,\text{máx}}$ calculado no item (a), ou seja,

$$F + F_2 > f_{s,\text{máx}} \Rightarrow \quad 110 \text{ N} + F_2 > 127 \text{ N}$$

o que nos dá $F_{2,\text{mín}}$ = 17 N.

14. (a) Vamos supor que o bloco está em repouso e que o ângulo de mergulho tem o valor $\theta_{\text{máx}}$ para o qual a força de atrito estático é a maior possível, $f_{s,\text{máx}}$. Aplicando a Segunda Lei de Newton na direção paralela e na direção perpendicular à encosta, temos:

$$mg \operatorname{sen}\theta_{\text{máx}} - f_{s,\text{máx}} = 0$$
$$F_N - mg\cos\theta_{\text{máx}} = 0$$

Resolvendo o sistema de equações acima e usando a Eq. 6-1, $f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N$, obtemos:

$$\theta_{\text{máx}} = \tan^{-1}\mu_s = \tan^{-1} 0{,}63 \approx 32°\,.$$

Como esse ângulo é maior que o ângulo de mergulho dado (24°), o bloco não desliza.

(b) Aplicando novamente a Segunda Lei de Newton, obtemos:

$$F + mg \operatorname{sen} \quad - f_{s,\text{máx}} = 0$$
$$F \quad - mg\cos \quad = 0$$

Resolvendo o sistema de equações acima, usando a Eq. 6-1 ($f_{s,\,\text{máx}} = \mu_s F_N$) e fazendo $\theta = 24°$ e m = 1,8 × 10^7 kg, obtemos:

$$F = mg\left(\mu_s \cos\theta - \operatorname{sen}\theta\right) = 3{,}0 \times 10^7 \text{ N}.$$

15. De acordo com o resultado obtido no item (a) do problema anterior,

$$\theta = \tan^{-1}\mu_s = \tan^{-1} 0{,}04 \approx 2°.$$

16. (a) Nesta situação, supomos que $\vec{f}_s$ aponta ladeira acima e está com o valor máximo, $\mu_s F_N$. Aplicando a Segunda Lei de Newton a um objeto de massa m, nas direções paralela e perpendicular à encosta, temos:

$$F_{\text{mín}1} - mg\operatorname{sen}\theta + \mu_s F_N = 0$$
$$F_N - mg\cos\theta = 0$$

Resolvendo o sistema de equações acima, obtemos:

$$F_{\text{mín }1} = mg(\operatorname{sen}\theta - \mu s\cos\theta)$$

que, para $m = P/g$ = 8,2 kg, θ = 20° e μ_s = 0,25, nos dá $F_{\text{mín }1}$ = 8,6 N.

(b) A única diferença em relação ao item anterior é que agora supomos que $\vec{f}_s$ aponta ladeira abaixo. Nesse caso, o sistema de equações é

$$F_{\text{mín }2} - mg\operatorname{sen}\theta - \mu s\, F_N = 0$$
$$F_N - mg\cos\theta = 0$$

Resolvendo o sistema de equações acima, obtemos

$$F_{\text{mín }2} = mg\left(\operatorname{sen}\theta + \mu_s\cos\theta\right) = 46 \text{ N}.$$

Na verdade, será necessário um valor ligeiramente maior que o valor calculado para fazer o trenó começar a subir a ladeira.

(c) Como agora estamos lidando com o atrito cinético (que aponta para baixo), o sistema de equações se torna

$$F - mg\operatorname{sen}\theta - f_k = ma$$
$$F_N - mg\cos\theta = 0$$

Resolvendo o sistema de equações acima, obtemos

$$F = mg(\operatorname{sen}\theta + \mu_k\cos\theta)$$

que, para $m = P/g$ = 8,2 kg, θ = 20° e μ_k = 0,15, nos dá F = 39 N.

17. Se o bloco começar a se mover, a força de atrito será a força de atrito cinético, dada pela Eq. 6-2; se permanecer em repouso, será a força de atrito estático, de módulo igual à soma do módulo da força $\vec{P}$ com a componente do peso do bloco paralela à superfície do plano inclinado. Antes de mais nada, portanto, é preciso saber se o bloco vai se mover quando a força $\vec{P}$ for aplicada, o que depende da força máxima de atrito estático, dada pela Eq. 6-1. Para calcular essa força, aplicamos a Segunda Lei de Newton na direção perpendicular à superfície do plano inclinado, o que nos dá

$$F_N - P\cos\theta = 0$$

em que P = 45 N é o peso do bloco e θ = 15° é o ângulo do plano inclinado. Assim, F_N = 43,5 N, o que significa que a força máxima de atrito estático é

$$f_{s,\text{máx}} = (0{,}50)\,(43{,}5 \text{ N}) = 21{,}7 \text{ N}.$$

(a) Para $\vec{P} = (-5{,}0\text{ N})\hat{\mathrm{i}}$, a Segunda Lei de Newton, aplicada à direção paralela à superfície do plano inclinado, nos dá

$$f - |P| - mg\,\text{sen}\,\theta = ma.$$

Ao escrever essa equação, estamos supondo que a força $\vec{f}$ aponta para cima; se a força apontar para baixo, o valor obtido para f será negativo. Se $f = f_s$, $a = 0$ e a equação se torna

$$f_s = |P| + mg\,\text{sen}\,\theta = 5{,}0\text{ N} + (43{,}5\text{ N})\text{sen}15° = 17\text{ N}.$$

Como f_s é menor que $f_{s,\,max}$, o bloco permanece em repouso e a força de atrito é $\vec{f}_s = (17\text{ N})\hat{\mathrm{i}}$.

(b) Para $\vec{P} = (-8{,}0\text{ N})\hat{\mathrm{i}}$, obtemos (usando a mesma equação) f_s = 20 N, que também é menor que $f_{s,\,máx}$, de modo que o bloco permanece em repouso e a força de atrito é $\vec{f}_s = (20\text{ N})\hat{\mathrm{i}}$.

(c) Para $\vec{P} = (-15\text{ N})\hat{\mathrm{i}}$, obtemos (usando a mesma equação) f_s = 27 N, que é maior que $f_{s,\,máx}$. A conclusão é que, nesse caso, o bloco entre em movimento e temos que usar o coeficiente de atrito cinético em vez do coeficiente de atrito estático. O resultado é o seguinte:

$$\vec{f}_k = \mu_k F_N \hat{\mathrm{i}} = (0{,}34)(43{,}5\text{ N})\hat{\mathrm{i}} = (15\text{ N})\hat{\mathrm{i}}\,.$$

18. (a) Aplicando a Segunda Lei de Newton ao carro A na direção "ladeira abaixo", temos:

$$mg\,\text{sen}\theta - f = ma$$

em que, de acordo com a Eq. 6-11,

$$f = f_k = \mu_k F_N = \mu_k\, mg\cos\theta$$

Assim, com μ_k = 0,600, temos:

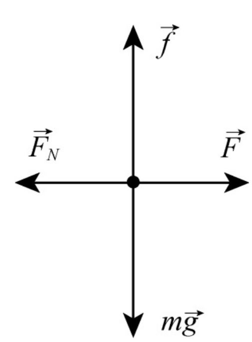
$$a = g\text{sen}\theta - \mu_k\cos\theta = -3{,}72\text{ m/s}^2$$

o que significa, como escolhemos como sentido positivo o sentido "ladeira abaixo", que o vetor aceleração aponta "ladeira acima", ou seja, que a velocidade do carro A estava diminuindo. Para $v_0 = 18{,}0$ m/s e $(x - x_0) = d$ = 24,0 m, a Eq. 2-16 nos dá

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2ad} = 12{,}1\text{ m/s}.$$

(b) Nesse caso, a aceleração calculada é a = +1,1 m/s^2 e a velocidade no momento do choque é 19,4 m/s.

19. (a) A figura mostra o diagrama de corpo livre do bloco. $\vec{F}$ é a força aplicada, $\vec{F}_N$ é a força normal que a parede exerce sobre o bloco, $\vec{f}$ é a força de atrito e $m\vec{g}$ é a força da gravidade. Para verificar se o bloco vai



se mover, calculamos o módulo f da força de atrito necessária para mantê-lo em repouso e calculamos também o módulo da força normal F_N que a parede exerce sobre o bloco. Se $f < \mu_s F_N$, o bloco permanece em repouso, mas se $f > \mu_s F_N$, o bloco desliza para baixo. Como não existe aceleração na direção horizontal, $F - F_N = 0$, $F_N = F = 12$ N e

$$\mu_s F_N = (0{,}60)(12 \text{ N}) = 7{,}2 \text{ N}.$$

Na direção vertical, para que $f - mg = 0$, $f = mg = 5{,}0$ N. Como $f < \mu_s F_N$, o bloco não se move.

(b) Como o bloco não se move, $f = 5{,}0$ N e $F_N = 12$ N. A força que a parede exerce sobre o bloco é

$$\vec{F}_p = -F_N \hat{\text{i}} + f\,\hat{\text{j}} = -(12 \text{ N})\hat{\text{i}} + (5{,}0 \text{ N})\hat{\text{j}}$$

em que os eixos são os que aparecem na Fig. 6-26 do livro.

20. Tratando as duas caixas como um único sistema de massa total $m_C + m_W = 1{,}0 + 3{,}0 = 4{,}0$ kg, sujeito a uma força de atrito total (para a esquerda) de módulo 2,0 N + 4,0 N = 6,0 N, aplicamos a Segunda Lei de Newton (com o sentido positivo do eixo x para a direita):

$$F - f_{\text{total}} = m_{\text{total}}\, a \quad \Rightarrow \quad 12{,}0 \text{ N} - 6{,}0 \text{ N} = (4{,}0 \text{ kg})a,$$

o que nos dá uma aceleração $a = 1{,}5$ m/s². Tratamos a força F como se fosse conhecida com precisão de décimos de newton, de modo que a aceleração foi calculada com dois algarismos significativos. Aplicando a Segunda Lei de Newton apenas à caixa maior (a caixa de Wheaties, de massa $m_W = 3{,}0$ kg) e chamando de $\vec{F}'$ a força de contato que a caixa de Cheerios exerce sobre a caixa de Wheaties, temos:

$$F' - f_W = m_W a \quad \Rightarrow \quad F' - 4{,}0 \text{ N} = (3{,}0 \text{ kg})(1{,}5 \text{ m/s}^2)\,,$$

o que nos dá $F' = 8{,}5$ N.

21. Vamos usar o mesmo sistema de coordenadas da Fig. 6-4 do livro.

(a) Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y, temos:

$$\begin{aligned} x:&\quad T\cos\theta - f = ma \\ y:&\quad T\,\text{sen}\,\theta + F_N - mg = 0 \end{aligned}$$

Fazendo $a = 0$ e $f = f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N$, calculamos a massa total do sistema caixa + areia (em função do ângulo θ):

$$m = \frac{T}{g}\left(\text{sen}\,\theta + \frac{\cos\theta}{\mu_s}\right)$$

que é a função que deve ser maximizada (para calcular o ângulo μ_m que permite puxar a maior quantidade possível de areia). Derivando a equação acima em relação a θ, temos:

$$\frac{dm}{d\theta} = \frac{T}{g}\left(\cos\theta_m - \frac{\text{sen}\,\theta_m}{\mu_s}\right) = 0$$

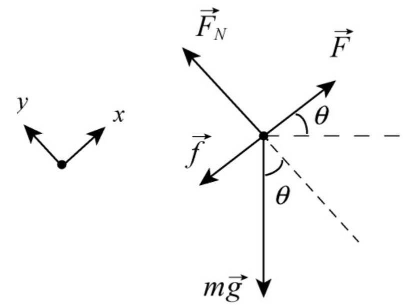
o que nos dá $\tan\theta_m = \mu_s$. Para $\mu_s = 0{,}35$, $\theta_m = \tan^{-1}(0{,}35) = 19°$.

(b) Substituindo o valor de μ_m calculado no item (a) na equação de m, obtemos $m = 340$ kg, o que corresponde a um peso de (340 kg)(9,80 m/s²) = $3{,}3 \times 10^3$ N.

22. A figura mostra o diagrama de corpo livre do trenó, em que $\vec{F}$ é a força aplicada, $\vec{F}_N$ é a força normal, $m\vec{g}$ é a força da gravidade e $\vec{f}$ é a força do atrito. Tomamos o eixo x paralelo à superfície do plano inclinado e o eixo y perpendicular à superfície. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y, temos:

$$F - f - mg\,\text{sen}\,\theta = 0$$

$$F_N - mg\cos\theta = 0$$



Como $f = \mu F_N$, e a segunda equação nos dá $F_N = mg\cos\theta$, $f = \mu mg\cos\theta$. Substituindo f por seu valor na primeira equação, obtemos

$$F = mg(\text{sen}\,\theta + \mu\cos\theta).$$

De acordo com o gráfico da Fig. 6-28, $F = 2{,}0$ N para $\mu = 0$. Isso significa que $mg\,\text{sen}\,\theta = 2{,}0$ N. Vemos também que $F = 5{,}0$ N para $\mu = 0{,}5$, o que nos dá:

$$5{,}0\text{ N} = mg(\text{sen}\,\theta + 0{,}50\cos\theta) = 2{,}0\text{ N} + 0{,}50mg\cos\theta,$$

ou seja, $mg\cos\theta = 6{,}0$ N. Combinando os dois resultados, obtemos

$$\tan\theta = \frac{2}{6} = \frac{1}{3} \quad\Rightarrow\quad \theta = 18°.$$

23. Vamos chamar a tensão da corda que liga o bloco 1 ao bloco 2 de T_{12} e a tensão da corda que liga o bloco 2 ao bloco 3 de T_{23}. Aplicando a Segunda Lei de Newton (e a Eq. 6-2, $F_N = m_2 g$ neste caso) ao sistema como um todo, temos:

$$\begin{aligned} m_3 g - T_{23} &= m_3 a \\ T_{23} - \mu_k m_2 g - T_{12} &= m_2 a \\ T_{12} - m_1 g &= m_1 a \end{aligned}$$

Somando as três equações e fazendo $m_1 = M$ e $m_2 = m_3 = 2M$, temos:

$$2Mg - 2\mu_k Mg - Mg = 5Ma.$$

Para $a = 0{,}500$ m/s^2 essa equação nos dá $\mu_k = 0{,}372$. Assim, o coeficiente de atrito cinético é, aproximadamente, $\mu_k = 0{,}37$.

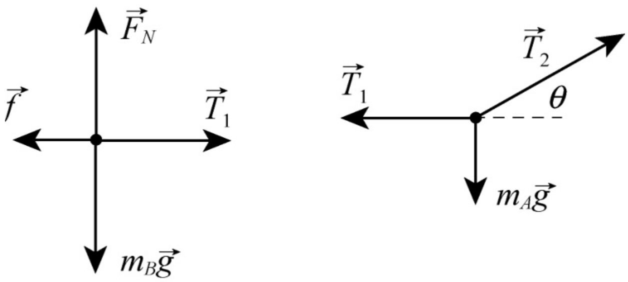
24. Podemos calcular a aceleração a partir da inclinação do gráfico da Fig. 6-30: $a = 4{,}5$ m/s^2. De acordo com a Segunda Lei de Newton,

$$F - \mu_k mg = ma,$$

em que $F = 40{,}0$ N é a força horizontal constante aplicada. Para $m = 4{,}1$ kg, obtemos $\mu_k = 0{,}54$.

25. PENSE Para que o sistema permaneça em repouso, é preciso que a força de atrito entre o bloco B e a superfície da mesa seja igual à força exercida pela corda sobre o bloco B.

FORMULE A figura adiante mostra os diagramas de corpo livre do bloco B e do nó verticalmente acima do bloco A. $\vec{T}_1$ é a força de tração que a corda 1 exerce sobre o bloco B e sobre o nó, $\vec{T}_2$ é a força de tração que a corda 2 exerce sobre o nó, $\vec{f}$ é a força de atrito estático que a superfície da mesa exerce sobre o bloco B, $\vec{F}_N$ é a força normal que a superfície da mesa exerce sobre o bloco B, $m_A\vec{g}$ é a força que a corda 3 exerce sobre o nó, e $m_B\vec{g}$ é a força gravitacional a que está submetido o bloco B.



Vamos tomar o sentido positivo do eixo x como para a direita e o sentido positivo do eixo y como para cima. Aplicando a segunda lei de Newton às componentes x e y do movimento do bloco B e fazendo o mesmo para as componentes do movimento do nó, obtemos o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} T_1 - f_{s,\text{máx}} &= 0 \\ F_N - W_B &= 0 \\ T_2 \cos\theta - T_1 &= 0 \\ T_2 \operatorname{sen}\theta - W_A &= 0 \end{aligned}$$

em que $W_B = gm_B$ é o peso do bloco B, e $W_A = gm_A$ é o peso do bloco A. De acordo com as três primeiras equações anteriores e a Eq. 6-1, $T_1 = \mu_s F_N$, $F_N = W_B$ e $T_1 = T_2 \cos\theta$.

ANALISE Substituindo os valores conhecidos na quarta equação e explicitando W_A, obtemos

$$\begin{aligned} W_A &= T_2 \operatorname{sen}\theta = T_1 \tan\theta = \mu_s F_N \tan\theta = \mu_s W_B \tan\theta \\ &= (0{,}25)(711\text{ N})\tan 30° = 1{,}0\times 10^2\text{ N} \end{aligned}$$

APRENDA Como era esperado, o peso máximo do bloco A é proporcional ao peso do bloco B e ao coeficiente de atrito estático. Além disso, W_A é proporcional a $\tan\theta$ (quanto maior o ângulo, maior a componente vertical de T_2 que sustenta o peso do bloco A).

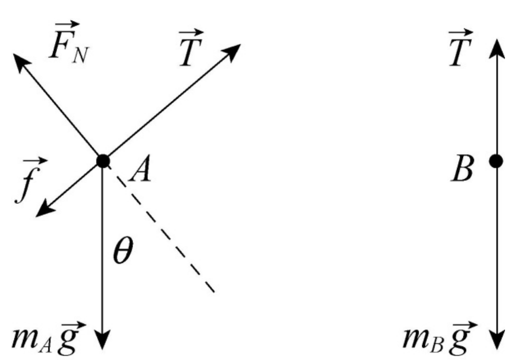
26. (a) Aplicando a Segunda Lei de Newton ao sistema como um todo (com M = 60 kg) e usando a Eq. 6-2 (com $F_N = Mg$ neste caso), obtemos:

$$F - \mu_k Mg = Ma \;\Rightarrow\; a = 0{,}473\text{ m/s}^2.$$

Aplicando a Segunda Lei de Newton apenas ao bloco 3, obtemos $F_{32} = m_3(a + \mu_k g) =$ 147 N. Combinando os dois resultados, encontramos uma relação interessante: $F_{32} = (m_3 / M)F$ (que não depende do atrito!).

(b) Como foi comentado no item anterior, o resultado não depende do atrito. Assim, o valor de F_{32} seria o mesmo do item (a).

27. Primeiro, vamos verificar se os blocos se movem. Supomos que permanecem em repouso e calculamos a força de atrito (estático) que os mantém em repouso, para compará-la com a força máxima de atrito estático $\mu_s F_N$. A figura mostra os diagramas de corpo livre dos dois blocos.



T é o módulo da tensão da corda, f é o módulo da força de atrito que age sobre o bloco A, F_N é o módulo da força normal que age sobre o bloco A, $m_A\vec{g}$ é a força da gravidade que age sobre o bloco A (de módulo P_A = 102 N) e $m_B\vec{g}$ é a força da gravidade que age sobre o bloco B (de módulo P_B = 32 N). $\theta = 40°$ é o ângulo do plano inclinado. Não conhecemos o sentido de $\vec{f}$, mas vamos supor que é para baixo. Se obtivermos um sinal negativo, isso significará que o sentido de $\vec{f}$ é para cima.

(a) No caso do bloco A, vamos tomar o eixo x encosta acima e o eixo y na direção da força normal. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y, temos:

$$T - f - P_A \operatorname{sen}\theta = 0$$
$$F_N - P_A \cos\theta = 0$$

Tomando o sentido positivo como *para baixo* para o bloco B, a Segunda Lei de Newton nos dá $P_B - T = 0$. Resolvendo esse sistema de equações, obtemos

$$f = P_B - P_A \operatorname{sen}\theta = 32 \text{ N} - (102 \text{ N}) \operatorname{sen} 40° = -34 \text{ N}$$

(o que mostra que a força de atrito é *para cima*) e

$$F_N = P_A \cos\theta = (102 \text{ N}) \cos 40^o = 78 \text{ N}$$

o que nos dá

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N = (0{,}56)\ (78 \text{ N}) = 44 \text{ N}.$$

Como o módulo f da força de atrito que mantém os blocos em repouso é menor que $f_{s,\text{máx}}$, os corpos permanecem em repouso.

(b) Se o bloco A está subindo a rampa, a força de atrito é para baixo, com módulo $f_k = \mu_k F_N$. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos mesmos eixos do item (a), obtemos:

$$T - f_k - P_A \operatorname{sen}\theta = m_A a$$
$$F_N - P_A \cos\theta = 0$$
$$P_B - T = m_B a$$

Resolvendo esse sistema de equações, obtemos:

$$a = \frac{P_B - P_A \operatorname{sen}\theta - \mu_k P_A \cos\theta}{m_B + m_A} = \frac{32 \text{ N} - (102 \text{ N}) \operatorname{sen} 40^o - (0{,}25)(102 \text{ N}) \cos 40^o}{(32 \text{ N} + 102 \text{ N})/(9{,}8 \text{ m/s}^2)}$$
$$= 3{,}9 \text{ m/s}^2$$

A aceleração é para baixo: $\vec{a} = (-3{,}9 \text{ m/s}^2)\hat{\text{i}}$. Isso significa (já que a velocidade inicial é para cima) que a velocidade dos blocos está diminuindo. Note que a relação $m = P/g$ foi usada para calcular as massas usadas na equação acima.

(c) Se o bloco A está descendo a rampa, a força de atrito é para cima, com módulo $f_k = \mu_k F_N$. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos mesmos eixos dos itens (a) e (b), obtemos:

$$T + f_k - P_A \operatorname{sen}\theta = m_A a$$
$$F_N - P_A \cos\theta = 0$$
$$P_B - T = m_B a$$

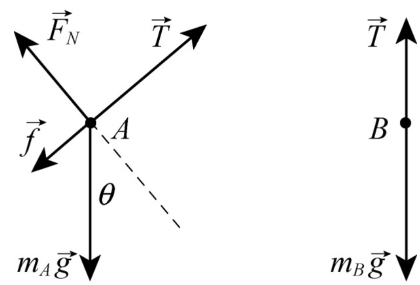
o que nos dá

$$a = \frac{P_B - P_A \operatorname{sen}\theta + \mu_k P_A \cos\theta}{m_B + m_A} = \frac{32 \text{ N} - (102 \text{ N}) \operatorname{sen} 40^o + (0{,}25)(102 \text{ N}) \cos 40^o}{(32 \text{ N} + 102 \text{ N})/(9{,}8 \text{ m/s}^2)}$$

$$= -1{,}0 \text{ m/s}^2$$

A aceleração é para baixo: $\vec{a} = (-1{,}0 \text{ m/s}^2)\hat{\text{i}}$. Nesse caso, isso significa (já que a velocidade inicial é para baixo) que a velocidade dos blocos está aumentando.

28. A figura mostra os diagramas de corpo livre dos dois blocos. T é o módulo da tensão do fio, f é o módulo da força de atrito que age sobre o bloco A, F_N é o módulo da força normal que a rampa exerce sobre o bloco A, $m_A\vec{g}$ é a força da gravidade sobre o bloco A, $m_B\vec{g}$ é a força da gravidade sobre o bloco B, e θ é o ângulo da rampa. No caso do bloco A, escolhemos um eixo x rampa acima e um eixo y na direção da força normal; no caso do bloco B, escolhemos um eixo y para baixo.



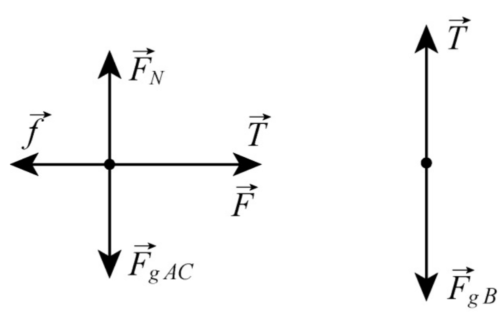
Como o bloco A está descendo, a força de atrito é para cima, com módulo $f_k = \mu_k F_N$. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos blocos A e B, temos:

$$T - f_k + m_A g \operatorname{sen}\theta = 0$$
$$F_N - m_A g \cos\theta = 0$$
$$m_B g - T = 0$$

Resolvendo esse sistema de equações, obtemos:.

$$m_B = m_A\left(\operatorname{sen}\theta - \mu_k \cos\theta\right) = 3{,}3 \text{ kg}.$$

29. (a) A figura mostra diagramas de corpo livre dos blocos A e C, considerados como um único objeto, e do bloco B.



T é o módulo da tensão da corda, F_N é o módulo da força normal que a mesa exerce sobre o bloco A, f é o módulo da força de atrito, P_{AC} é o peso total dos blocos A e C (o módulo da força $\vec{F}_{g\,AC}$ mostrada na figura) e P_B é o peso do bloco B (o módulo da força $\vec{F}_{g\,B}$ mostrada na figura). Supomos que os blocos estão em repouso. Para os blocos que estão sobre a mesa, escolhemos um eixo x orientado para a direita e um eixo y orientado para cima. De acordo com a Segunda Lei de Newton, temos:

componentes x: $\quad T - f = 0$

componentes y: $\quad F_N - W_{AC} = 0.$

No caso do bloco B, escolhemos um eixo y orientado para baixo. Nesse caso, a Segunda Lei de Newton nos dá $P_B - T = 0$. De acordo com a terceira equação, $T = P_B$ e, de acordo com a primeira, $f = T$. A segunda equação nos dá $F_N = P_{AC}$. Para que o sistema permaneça em repouso, f deve ser menor que $\mu_s F_N$, o que significa que $P_B < \mu_s P_{AC}$. O menor valor que P_{AC} pode ter sem que os blocos se movam é

$$P_{AC} = P_B/\mu_s = (22\text{ N})/(0{,}20) = 110\text{ N}.$$

Como o peso do bloco A é 44 N, o menor peso que o bloco C pode ter é (110 – 44) N = 66 N.

(b) Se o bloco C é removido, as equações do item (a) se tornam

$$\begin{aligned} T - f &= (P_A/g)a \\ F_N - W_A &= 0 \\ P_B - T &= (P_B/g)a. \end{aligned}$$

Além disso, $f = \mu_k F_N$. A segunda equação nos dá $F_N = P_A$, e, portanto, $f = \mu_k P_A$. A terceira equação nos dá $T = P_B - (P_B/g)a$. Substituindo essas duas expressões na primeira equação, temos:

$$P_B - (P_B/g)a - \mu_k P_A = (P_A/g)a.$$

Assim,

$$a = \frac{g\left(P_B - \mu_k P_A\right)}{P_A + P_B} = \frac{(9{,}8\text{ m/s}^2)\left(22\text{ N} - (0{,}15)(44\text{ N})\right)}{44\text{ N} + 22\text{ N}} = 2{,}3\text{ m/s}^2.$$

30. Escolhemos um eixo x horizontal orientado para a direita e um eixo y vertical orientado para cima. Supomos que a massa da corda é desprezível, de modo que a força $\vec{F}$ exercida pela criança é igual à tensão da corda. As componentes x e y de $\vec{F}$ são $F\cos\theta$ e $F\text{sen}\theta$, respectivamente. A força de atrito estático aponta para a esquerda.

(a) Aplicando a Segunda Lei de Newton ao eixo y e supondo que a aceleração vertical é nula, temos:

$$F_N + F\,\text{sen}\,\theta - mg = 0$$

o que mostra que o atrito estático máximo é $\mu_s(mg - F\text{ sen }\theta)$. Supondo que $f_s = f_{s,\,\text{máx}}$, a aplicação da Segunda Lei de Newton ao eixo x (para o qual a aceleração também é nula se a caixa de brinquedos está na iminência de se mover), temos:

$$F\cos\theta - f_s = ma \quad\Rightarrow\quad F\cos\,\theta - \mu_s(mg - F\text{sen}\theta) = 0.$$

Fazendo $\theta = 42°$ e $\mu_s = 0{,}42$, obtemos $F = 74$ N.

(b) Explicitando F e chamando de P o peso da caixa de brinquedos, temos:

$$F = \frac{\mu_s P}{\cos\theta + \mu_s\text{sen}\theta} = \frac{(0{,}42)(180\text{ N})}{\cos\theta + (0{,}42)\text{ sen}\theta} = \frac{76\text{ N}}{\cos\theta + (0{,}42)\text{ sen}\theta}.$$

(c) Para determinar o valor de θ para o qual F é mínimo, derivamos a expressão obtida no item (b) em relação a θ e igualamos o resultado a zero:

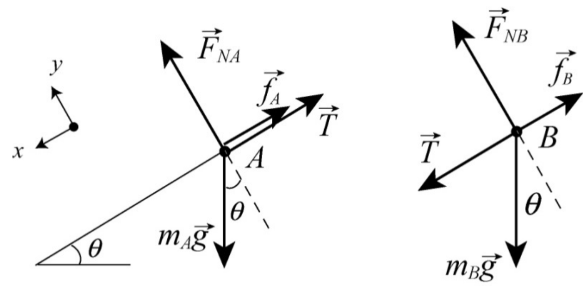
$$\frac{dF}{d\theta} = \frac{\mu_s W(\text{sen}\theta - \mu_s\cos\theta)}{(\cos\theta + \mu_s\text{ sen }\theta)^2} = 0,$$

o que nos dá $\theta = \tan^{-1}\mu_s = 23°$.

(d) Fazendo $\theta = 23°$ na expressão de F, com $\mu_s = 0{,}42$ e $P = 180$ N, obtemos $F = 70\text{ N}$.

31. PENSE Este problema envolve dois blocos, ligados por uma corda, com diferentes coeficientes de atrito cinético, que deslizam para baixo em um plano inclinado.

FORMULE A figura que se segue mostra os diagramas de corpo livre dos dois blocos. T é o módulo da força de tração da corda, $\vec{F}_{NA}$ é a força normal que a superfície do plano inclinado exerce sobre o bloco A (o bloco da frente), $\vec{F}_{NB}$ é a força normal que a superfície do plano inclinado exerce sobre o bloco B, $\vec{f}_A$ é a força de atrito cinético que age sobre o bloco A, $\vec{f}_B$ é a força de atrito cinético que age sobre o bloco B, m_A é a massa do bloco A, m_B é a massa do bloco B, e θ é o ângulo do plano inclinado.



Vamos tomar o sentido positivo do eixo x como sendo para a direita e o sentido positivo do eixo y como sendo para cima. Aplicando a segunda lei de Newton às componentes x e y do movimento dos blocos A e B, obtemos o seguinte sistema de equações:

$$W_A \operatorname{sen}\theta - f_A - T = m_A a$$
$$F_{NA} - W_A \cos\theta = 0$$
$$W_B \operatorname{sen}\theta - f_B + T = m_B a$$
$$F_{NB} - W_B \cos\theta = 0$$

em que $W_A = gm_A$ é o peso do bloco A, e $W_B = gm_B$ é o peso do bloco B. Combinando essas equações com a Eq. 6-2 (que, no caso, nos dá $f_A = \mu_{kA}F_{NA}$ e $f_B = \mu_{kB}F_{NB}$, podemos descrever o comportamento do sistema.

ANALISE (a) De acordo com as equações anteriores, a aceleração dos blocos é

$$a = g\left(\operatorname{sen}\theta - \left(\frac{\mu_{kA}W_A + \mu_{kB}W_B}{W_A + W_B}\right)\cos\theta\right) = 3{,}5\ \text{m/s}^2$$

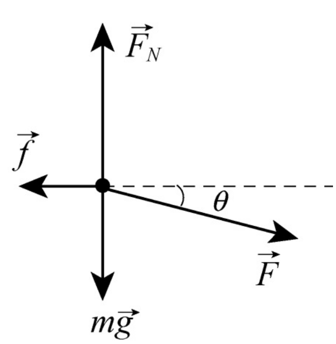
(b) De acordo com as equações anteriores, a tração da corda é

$$T = \left(\frac{W_A W_B}{W_A + W_B}\right)(\mu_{kB} - \mu_{kA})\cos\theta = \frac{(3{,}6\ \text{N})(7{,}2\ \text{N})}{3{,}6\ \text{N} + 7{,}2\ \text{N}}(0{,}20 - 0{,}10)\cos 30° = 0{,}21\ \text{N}$$

APRENDA A tração da corda é proporcional a $\mu_{kB} - \mu_{kA}$, a diferença entre os coeficientes de atrito cinético dos dois blocos. Quando os coeficientes são iguais ($\mu_{kB} = \mu_{kA}$), os blocos se movem de forma independente, e a tração da corda é zero. Quando o coeficiente do bloco da frente é maior que o coeficiente do bloco de trás ($\mu_{kB} < \mu_{kA}$), a tração da corda também é zero porque o bloco de trás desce mais depressa que o bloco da frente e, portanto, a corda permanece frouxa o tempo todo. Nesse caso, porém, as equações de movimento devem ser modificadas para levar em conta o fato de que as acelerações dos dois blocos são diferentes.

32. O diagrama de corpo livre do bloco é mostrado na figura. $\vec{F}$ é a força aplicada ao bloco, é a força normal que o piso exerce sobre o bloco, $m\vec{g}$ é a força da gravidade e $\vec{f}$ é a força de atrito. Tomamos o eixo x como horizontal, orientado para a direita, e o eixo y como vertical, orientado para cima. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y, temos:

$$F_x = F\cos\theta - f = ma$$
$$F_y = F_N - F\operatorname{sen}\theta - mg = 0$$



Como $f = \mu_k F_N$ e a segunda equação nos dá $F_N = mg + F \operatorname{sen} \theta$, temos:

$$f = \mu_k (mg + F \operatorname{sen} \theta) .$$

Substituindo f por seu valor na primeira equação, obtemos

$$F \cos \theta - \mu_k (mg + F \operatorname{sen} \theta) = ma$$

e, portanto, a aceleração é

$$a = \frac{F}{m}\left(\cos \theta - \mu_k \operatorname{sen} \theta\right) - \mu_k g .$$

De acordo com o gráfico, $a = 3{,}0 \text{ m/s}^2$ para $\mu_k = 0$. Isso nos dá

$$3{,}0 m/s^2 = \frac{F}{m} \cos \theta .$$

O gráfico também mostra que $a = 0$ para $\mu_k = 0{,}20$ e, portanto,

$$0 = \frac{F}{m}(\cos \theta - (0{,}20) \operatorname{sen} \theta) - (0{,}20)(9{,}8 \text{ m/s}^2) = 3{,}00 \text{ m/s}^2 - 0{,}20 \frac{F}{m} \operatorname{sen} \theta - 1{,}96 \text{ m/s}^2$$
$$= 1{,}04 \text{ m/s}^2 - 0{,}20 \frac{F}{M} \operatorname{sen} \theta$$

o que nos dá $5{,}2 \text{ m/s}^2 = \frac{F}{m} \operatorname{sen} \theta$. Combinando os dois resultados, obtemos

$$\tan \theta = \left(\frac{5{,}2 \text{ m/s}^2}{3{,}0 \text{ m/s}^2} \right) = 1{,}73 \quad \Rightarrow \quad \theta = 60°.$$

33. PENSE Neste problema, como a força de atrito varia com a velocidade, precisamos usar uma integral para calcular a velocidade em função do tempo.

FORMULE Vamos chamar o módulo da força de atrito de αv, em que α é uma constante, e supor que o barco está se movendo no sentido positivo do eixo de referência. Nesse caso, de acordo com a segunda lei de Newton,

$$-\alpha v = m \frac{dv}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{dv}{v} = -\frac{\alpha}{m} dt$$

Integrando ambos os membros da equação anterior, obtemos

$$\int_{v_0}^{v} \frac{dv}{v} = -\frac{\alpha}{m} \int_0^t dt$$

em que v_0 é a velocidade no instante em que o motor é desligado, e v é a velocidade no instante t. Resolvendo a integral, podemos calcular o tempo necessário para que a velocidade do barco diminua para 45 km/h, ou seja, para $v_0/2$, já que $v_0 = 90$ km/h.

ANALISE Resolvendo a integral, obtemos a equação

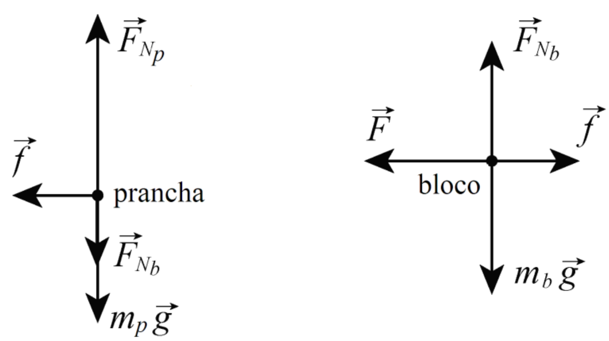
$$\ln\left(\frac{v}{v_0}\right) = -\frac{\alpha t}{m}$$

Para $v = v_0/2$ e $m = 1000$ kg, temos

$$t=-\frac{m}{\alpha}\ln\left(\frac{v}{v_0}\right)=-\frac{m}{\alpha}\ln\left(\frac{1}{2}\right)=-\frac{1000\text{ kg}}{70\text{ N}\cdot\text{s/m}}\ln\left(\frac{1}{2}\right)=9{,}9\text{ s}$$

APRENDA A velocidade do barco é dada por $v(t)=v_0e^{-\alpha t/m}$; isso mostra que a velocidade diminui exponencialmente com o tempo. Quanto maior o valor de α, mais depressa a velocidade diminui com o tempo.

34. A figura mostra os diagramas de corpo livre da prancha e do bloco.



$\vec{F}$ é a força aplicada ao bloco, $\vec{F}_{Np}$ é a força normal aplicada à prancha pelo piso, F_{Nb} é o módulo da força normal entre a prancha e o bloco, $\vec{f}$ é a força de atrito entre a prancha e o bloco, m_p é a massa da prancha e m_b é a massa do bloco. Para os dois objetos, o eixo x é horizontal, orientado para a direita, e o eixo y é vertical, orientado para cima.

Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y dos dois objetos, obtemos quatro equações:

$$-f=m_pa_p$$
$$F_{Np}-F_{Nb}-m_pg=0$$
$$f-F=m_ba_b$$
$$F_{Nb}-m_bg=0$$

De acordo com a quarta equação, a maior força de atrito estático possível entre o bloco e a prancha é

$$\mu_pF_{Nb}=\mu_pm_bg=(0,60)(10\text{ kg})(9{,}8\text{ m/s}^2)=59\text{ N}\,.$$

Vamos verificar se o bloco desliza sobre a prancha. Supondo que isso não aconteça, $a_p = a_b$ (que vamos chamar simplesmente de a). Nesse caso, a força de atrito é

$$f=\frac{m_pF}{m_p+m_b}=\frac{(40\text{ kg})(100\text{ N})}{40\text{ kg}+10\text{ kg}}=80\text{ N}$$

que é maior que $f_{s,\text{máx}}$. Isso mostra que o bloco desliza sobre a prancha, de modo que temos que usar o coeficiente de atrito cinético.

(a) Fazendo $f=\mu_kF_{Nb}$ nas equações acima, temos:

$$a_b=\frac{\mu_km_bg-F}{m_b}=\frac{(0{,}40)(10\text{ kg})(9{,}8\text{ m/s}^2)-100\text{ N}}{10\text{ kg}}=-6{,}1\text{ m/s}^2.$$

O sinal negativo mostra que a aceleração do bloco é para a esquerda, ou seja,

$$\vec{a}_b = (-6{,}1\ \text{m/s}^2)\hat{\text{i}}.$$

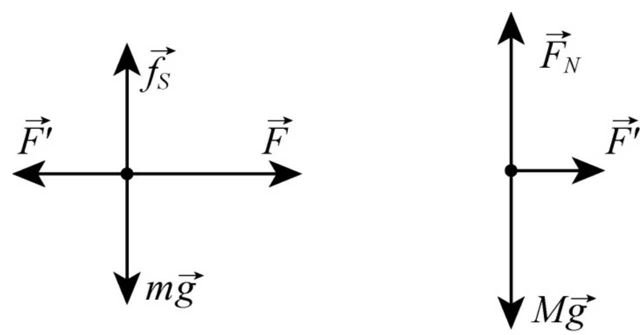
(b) Temos também:

$$a_p = -\frac{\mu_k m_b g}{m_p} = -\frac{(0{,}40)(10\ \text{kg})(9{,}8\ \text{m/s}^2)}{40\ \text{kg}} = -0{,}98\ \text{m/s}^2.$$

O sinal negativo mostra que a aceleração da prancha também é para a esquerda, ou seja,

$$\vec{a}_p = (-0{,}98\ \text{m/s}^2)\hat{\text{i}}.$$

35. Os diagramas de corpo livre dos dois blocos são mostrados na figura a seguir. F' é a força de contato entre os dois blocos e a força de atrito estático $\vec{f}_s$ está com o valor máximo (de modo que, de acordo com a Eq. 6-1, $f_s = f_{s,\text{máx}} = \mu_s F'$).



Tratando os dois blocos como um sistema único (que desliza no piso sem atrito), usamos a Segunda Lei de Newton para obter uma expressão para a aceleração:

$$F = m_{\text{total}}\ a \quad \Rightarrow a = \frac{F}{m+M}$$

Aplicando a Segunda Lei de Newton ao bloco m e substituindo a pelo valor calculado acima, obtemos as seguintes equações:

$$F - F' = ma \quad \Rightarrow \quad F' = F - m\left(\frac{F}{m+M}\right)$$

$$f_s - mg = 0 \quad \Rightarrow \quad \mu_s F' - mg = 0$$

Eliminando F' nas equações acima, obtemos:

$$F = \frac{mg}{\mu_s\left(1 - \dfrac{m}{m+M}\right)} = 4{,}9\times10^2\ \text{N}.$$

36. Explicitando a área da seção reta efetiva na Eq. 6-16, obtemos a equação $A = \dfrac{2F_g}{C\rho v_t^2}$, segundo a qual a área é inversamente proporcional à velocidade ao quadrado. Assim, dividindo a área na posição de menor velocidade pela área de maior velocidade, temos:

$$\frac{A_{\text{menor}}}{A_{\text{maior}}} = \left(\frac{v_{maior}}{v_{menor}}\right)^2 = \left(\frac{310\ \text{km/h}}{160\ \text{km/h}}\right)^2 = 3{,}75.$$

37. Na solução do Problema 8, vimos que a força do vento sobre a pedra teria que ser pelo menos $F = 160$ N para manter a pedra em movimento.

(a) Fazendo $F = D$ (a força de arrasto), podemos usar a Eq. 6-14 para calcular a velocidade do vento em relação ao solo (na verdade, deveria ser a velocidade do vento em relação à pedra, mas a velocidade da pedra é tão pequena que a diferença é desprezível):

$$V=\sqrt{\frac{2F}{C\rho A}}=\sqrt{\frac{2(157\text{ N})}{(0,80)(1,21\text{ kg/m}^3)(0,040\text{ m}^2)}}=90\text{ m/s }=320\text{ km/h.}$$

(b) Multiplicando por 2 o resultado do item anterior, obtemos uma velocidade de $6,4\times10^2$ km/h.

(c) Não, não é razoável. O vento de um furacão da categoria 5 (a maior de todas) é da ordem de 260 km/h.

38. (a) De acordo com a Eq. 6-14,

$$D=\frac{1}{2}C\rho Av^2$$

em que C é o coeficiente de arrasto, ρ é a massa específica do ar, A é a seção reta efetiva do conjunto piloto + assento e v é a velocidade do avião no momento da ejeção. Como no enunciado é dito que o coeficiente de arrasto é o mesmo que o de um paraquedista, podemos escrever, com base na Eq. 6-16,

$$v_t=\sqrt{\frac{2F_g}{C\rho A}}\ \Rightarrow C\rho A=2\frac{mg}{v_t^2}$$

em que, de acordo com a Tabela 6-1, v_t = 60 m/s no caso de um paraquedista. Substituindo na primeira equação, obtemos:

$$D=\frac{1}{2}\left(2\frac{mg}{60^2}\right)v^2=mg\left(\frac{v}{60}\right)^2$$

Convertendo a velocidade do avião para unidades do SI, temos: v = (1300)(1000)/3600 × 360 m/s. Supondo que a massa do piloto é 70 kg, obtemos: D = (70 kg)(9,8 m/s^2)(360/60)^2 ≈ 2 × 10^4 N.

(b) Supondo que a massa do assento é igual à massa do piloto, a Segunda Lei de Newton nos dá

$$|a|=\frac{D}{2m}=\frac{g}{2}\left(\frac{v}{60}\right)^2=18g\ .$$

39. No caso de um avião a jato, $D_j=\frac{1}{2}C\rho_1Av_j^2$, enquanto para um avião a hélice $D_h=\frac{1}{2}C\rho_2Av_h^2$, na qual ρ_1 e representam a massa específica do ar a 10 km e 5,0 km de altitude, respectivamente. Assim, a razão pedida é

$$\frac{D_j}{D_h}=\frac{\rho_1v_j^2}{\rho_2v_h^2}=\frac{\left(0,38\ \text{ kg/m}^3\right)\left(1000\ \text{ km/h}\right)^2}{\left(0,67\ \text{ kg/m}^3\right)\left(500\ \text{ km/h}\right)^2}=2,3.$$

40. (a) A força que age sobre o esquiador é

$$\begin{aligned}F_g&=mg\,\text{sen}\,\theta-\mu F_N=mg\,\text{sen}\,\theta-\mu mg\cos\theta=mg(\text{sen}\,\theta-\mu\cos\theta)\\&=(85,0\text{ kg})(9,80\text{ m/s}^2)\left[\text{sen}\,40,0°-(0,04000)\cos40,0°\right]\\&=510\text{ N.}\end{aligned}$$

Assim, a velocidade terminal do esquiador é

$$v_t=\sqrt{\frac{2F_g}{C\rho A}}=\sqrt{\frac{2(510\text{ N})}{(0,150)(1,20\text{ kg/m}^3)(1,30\text{ m}^2)}}=66,0\text{ m/s.}$$

(b) Derivando v_t em relação a C, obtemos

$$\begin{aligned}dv_t&=-\frac{1}{2}\sqrt{\frac{2F_g}{\rho A}}\,C^{-3/2}dC=-\frac{1}{2}\sqrt{\frac{2(510\text{ N})}{(1,20\text{ kg/m}^3)(1,30\text{ m}^2)}}(0,150)^{-3/2}dC\\&=-(2,20\times10^2\ \text{ m/s})dC.\end{aligned}$$

41. De acordo com as Eqs. 4-35 e 6-23, temos:

$$\mu_s = (2\pi R/T)^2/gR = 4\pi^2 R/gT^2.$$

o que, para $T = 6{,}0$ s e $R = 5{,}4$ m, nos dá $\mu_s = 0{,}60$.

42. O módulo da aceleração do carro ao fazer a curva é v^2/R, na qual v é a velocidade do carro e R é o raio da curva. Como a curva não é compensada, apenas o atrito com a estrada torna possível essa aceleração. Aplicando a Segunda Lei de Newton à força de atrito, temos: $f = mv^2/R$. Se F_N é a força normal e m é a massa do carro, o equilíbrio de forças na direção vertical nos dá $F_N = mg$. De acordo com a Eq. 6-1, o valor máximo do atrito estático é

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N = \mu_s mg.$$

Para que o carro não derrape, devemos ter $f \le \mu_s mg$. Isso significa que

$$\frac{v^2}{R} \le \mu_s g \;\Rightarrow\; v \le \sqrt{\mu_s Rg}.$$

Assim, a velocidade máxima com a qual o carro pode fazer a curva sem derrapar é

$$v_{\max} = \sqrt{\mu_s Rg} = \sqrt{(0{,}60)(30{,}5\text{ m})(9{,}8\text{ m/s}^2)} = 13\text{ m/s} \approx 48\text{ km/h}.$$

43. Usando o mesmo raciocínio do problema anterior, chegamos às relações

$$\frac{v^2}{R} \le \mu_s g \;\Rightarrow\; R \ge \frac{v^2}{\mu_s g}.$$

Assim, o raio mínimo da curva que o ciclista pode fazer sem derrapar é

$$R_{\min} = \frac{v^2}{\mu_s g} = \frac{[(29)(1000)/3600]^2}{(0{,}32)(9{,}8)} = 21\text{ m}.$$

44. Para $v = 96{,}6$ km/h $= 26{,}8$ m/s, a Eq. 6-17 nos dá

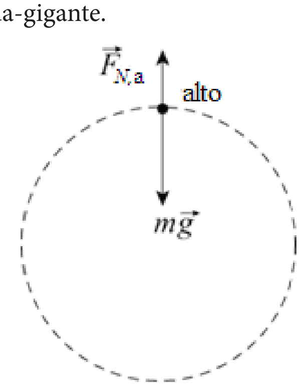
$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{(26{,}8\text{ m/s})^2}{7{,}6\text{ m}} = 94{,}7\text{ m/s}^2$$

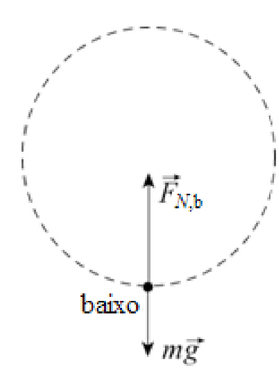
que podemos expressar em unidades de g:

$$a = \left(\frac{a}{g}\right) g = \left(\frac{94{,}7\text{ m/s}^2}{9{,}80\text{ m/s}^2}\right) g = 9{,}7g.$$

45. PENSE O movimento da roda-gigante é um movimento circular em um plano vertical; o peso aparente de um passageiro varia de forma periódica.

FORMULE A figura a seguir mostra os digramas de corpo livre do estudante no ponto mais alto e no ponto mais baixo do percurso da roda-gigante.





No ponto mais alto do percurso, o assento exerce sobre o estudante uma força de módulo $F_{N,a}$, enquanto a Terra exerce sobre o estudante uma força de módulo mg. De acordo com a segunda lei de Newton,

$$mg - F_{N,a} = \frac{mv^2}{R}$$

No ponto mais baixo do percurso, o assento exerce sobre o estudante uma força de módulo $F_{N,b}$, enquanto a Terra exerce sobre o estudante uma força de módulo mg. De acordo com a segunda lei de Newton,

$$F_{N,b} - mg = \frac{mv^2}{R}$$

Supondo que a velocidade angular da roda-gigante é constante, o valor da força centrípeta $F_c = mv^2/R$ é constante. O peso aparente do estudante é F_N.

ANALISE (a) De acordo com o enunciado do problema, no ponto mais alto do percurso, $F_{N,a} = 556$ N e $mg = 667$ N. Isso significa que o assento exerce sobre o estudante uma força menor que o seu peso e, portanto, ele se sente mais leve que o normal.

(b) De acordo com o resultado do item (a), a força centrípeta é

$$F_c = \frac{mv^2}{R} = mg - F_{N,a} = 667\text{ N} - 556\text{ N} = 111\text{ N}$$

Assim, a força normal no ponto mais baixo do circuito é

$$F_{N,b} = \frac{mv^2}{R} + mg = F_c + mg = 111\text{ N} + 667\text{ N} = 778\text{ N}$$

Isso significa que o assento exerce sobre o estudante uma força maior que o peso e, portanto, ele se sente mais pesado que o normal.

(c) Se a velocidade for multiplicada por dois, a nova força centrípeta será

$$F'_c = \frac{m(2v)^2}{R} = 4(111\text{ N}) = 444\text{ N}$$

Portanto, no ponto mais alto do percurso,

$$F'_{N,a} = mg - F'_c = 667\text{ N} - 444\text{ N} = 223\text{ N}$$

(d) No ponto mais baixo do percurso,

$$F'_{N,b} = F'_c + mg = 444\text{ N} + 667\text{ N} = 1111\text{ N}$$

APRENDA O peso aparente do estudante é máximo no ponto mais baixo do percurso e mínimo no ponto mais alto. Se a velocidade tangencial da roda-gigante fosse $v = \sqrt{gR}$, $F_{N,a} = 0$ e, portanto, o estudante se sentiria sem peso no ponto mais alto do percurso.

46. (a) Uma velocidade de 80,0 km/h equivale a aproximadamente 22,2 m/s em unidades do SI. A força horizontal que impede que a policial escorregue do assento é igual à força centrípeta (Eq. 6-18) e a força vertical é igual ao seu peso, mg. Assim,

$$F_{\text{res}} = \sqrt{(mg)^2 + (mv^2/R)^2} = 547\text{ N}.$$

(b) O ângulo é $\tan^{-1}[(mv^2/R)/(mg)] = \tan^{-1}(v^2/gR) = 9{,}53°$ (em relação à vertical).

47. (a) De acordo com a Eq. 4-35, $T = 2\pi R/v = 2\pi(10\text{ m})/(6{,}1\text{ m/s}) = 10$ s.

(b) A situação é semelhante à do Problema 45. No ponto mais alto do percurso,

$$F_N = m(g - v^2/R) = 486 \text{ N}.$$

(c) No ponto mais baixo do percurso,

$$F_N = m(g + v^2/R) = 1081 \text{ N}.$$

48. Como a situação é semelhante à do problema anterior (quando a roda-gigante está no ponto mais alto do percurso), a força normal é dada por

$$F_N = m(g - v^2/R)$$

(a) Para m = 1200 kg, v = 11 m/s e R = 18 m, obtemos $F_N = 3{,}7 \times 10^3$ N.

(b) $\vec{F}_N$ aponta para cima.

(c) Para v = 14 m/s, $F_N = -1{,}3 \times 10^3$ N, ou $|F_N| = 1{,}3 \times 10^3$ N.

(d) O fato de que o valor de F_N é negativo significa que, nesse caso, $\vec{F}_N$ aponta para baixo.

49. No alto do vale, a situação é semelhante à do problema anterior e a força normal é dada por

$$F_N = m(g - v^2/R).$$

que, para $F_N = 0$, nos dá $v^2/R = g$.

No fundo do vale, a situação é semelhante à do item (c) do Problema 47 e a força normal é dada por

$$F_N = m(g + v^2/R)$$

que, para $v^2/R = g$, nos dá F_N = 2mg = 1372 N ≈ $1{,}37 \times 10^3$ N.

50. Sabemos que o gráfico da Fig. 6-40*a* representa uma função da forma $F = mv^2/r$.

(a) A inclinação do gráfico para $v = 8{,}30$ m/s é

$$\left.\frac{dF}{dv}\right|_{v=8{,}30\text{ m/s}} = \left.\frac{2mv}{r}\right|_{v=8{,}30\text{ m/s}} = \frac{2(85{,}0\text{ kg})(8{,}30\text{ m/s})}{3{,}50\text{ m}} = 403\text{ N}\cdot\text{s/m}.$$

(b) Como o período do movimento é $T = 2\pi r/v$,

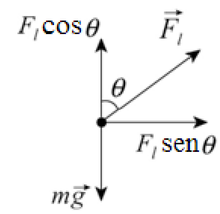
$$F = \frac{mv^2}{r} = \frac{m}{r}\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = \frac{4\pi^2 mr}{T^2},$$

e a inclinação do gráfico da Fig. 6-40*b* para T = 2,50 s é

$$\left.\frac{dF}{dT}\right|_{T=2{,}50\text{ s}} = -\left.\frac{8\pi^2 mr}{T^3}\right|_{T=2{,}50\text{ s}} = \frac{8\pi^2(85{,}0\text{ kg})(3{,}50\text{ m})}{(2{,}50\text{ s})^3} = -1{,}50\times 10^3\text{ N/s}.$$

51. PENSE Um avião está descrevendo um movimento circular com as asas inclinadas, e devemos calcular o raio da circunferência a partir da força centrípeta.

FORMULE Na figura, que é o diagrama de corpo livre do avião, $m\vec{g}$ é a força gravitacional e $\vec{F}_l$ é a força de sustentação aerodinâmica. Vamos tomar o sentido positivo do eixo x como sendo para a direita e o sentido positivo do eixo y como sendo para cima. Aplicando a segunda lei de Newton às componentes x e y do movimento do avião, obtemos o seguinte sistema de equações:



$$F_l \,\text{sen}\,\theta = m\frac{v^2}{R}$$
$$F_l \cos\theta = mg$$

A segunda equação nos dá $m = (F_l \cos\theta)/g$. Substituindo m por seu valor na primeira equação e explicitando R, obtemos a relação $R = v^2/(g \tan\theta)$.

ANALISE Para v = 480 km/h = 133 m/s e θ = 40°, temos

$$R = \frac{v^2}{g\tan\theta} = \frac{(133\text{ m/s})^2}{(9{,}8\text{ m/s}^2)\tan 40°} = 2151\text{ m} \approx 2{,}2\times 10^3\text{ m}$$

APRENDA Observe que a abordagem que usamos para resolver o problema é a mesma do Exemplo 6.06 do livro.

52. A situação é semelhante à do Problema 45, com a força normal F_N substituída pela força da haste F_H. Assim, no ponto mais alto da trajetória, $F_H = mv^2/r - P$, em que P é o peso do carro com os passageiros.

(a) Para v = 5,0 m/s, r = 10 m e P = 5000 N, $F_H = 3{,}7 \times 10^3$ N.

(b) O sentido de $\vec{F}_H$ é para cima.

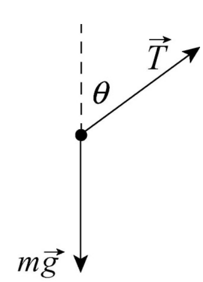
(c) Para v = 10,0 m/s, r = 10 m e P = 5000 N, $F_H = -2{,}3 \times 10^3$ N.

(d) O sinal negativo indica que o sentido de $\vec{F}_H$ é para baixo.

53. O diagrama de corpo livre de uma das alças foi traçado do ponto de vista que um passageiro teria se estivesse olhando para a frente e o bonde fizesse uma curva para a direita. Note que $\vec{a} = v^2/R$, na qual v = 16 km/h = 4,4 m/s.

Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos do problema (x para a direita e y para cima), temos:

$$T\,\text{sen} \qquad m\text{—}$$
$$T\cos \qquad mg.$$



Resolvendo esse sistema de equações, obtemos:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v^2}{Rg}\right)$$

que nos dá θ = 12°.

54. A força centrípeta experimentada pelos passageiros é $F = mv^2/r$.

(a) A variação de F com r sem que v varie é $dF = -\dfrac{mv^2}{r^2}dr$.

(b) A variação de F com v sem que r varie é $dF = \dfrac{2mv}{r}dv$.

(c) O período de uma trajetória circular é $T = 2\pi r / v$. Assim,

$$F = \frac{mv^2}{r} = \frac{m}{r}\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = \frac{4\pi^2 mr}{T^2},$$

e a variação de F com T sem que r varie é

$$dF = -\frac{8\pi^2 mr}{T^3}dT = -8\pi^2 mr\left(\frac{v}{2\pi r}\right)^3 dT = -\left(\frac{mv^3}{\pi r^2}\right)dT.$$

55. Note que, como o período T é oito vezes maior que o intervalo entre os lampejos (1/2000 s), T = 0,0040 s. Combinando a Eq. 6-18 com a Eq. 4-35, temos:

$$F = \frac{4m\pi^2 R}{T^2} = \frac{4(0{,}030\text{ kg})\pi^2(0{,}035\text{ m})}{(0{,}0040\text{ s})^2} = 2{,}6\times 10^3\text{ N}.$$

56. Podemos usar diretamente o resultado do Problema 53:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v^2}{gR}\right)$$

com v = 60(1000/3600) = 17 m/s e R = 200 m. O ângulo de compensação é, portanto, θ = 8,1°. Considere um carro que entre na curva com uma velocidade v' = 40(1000/3600) = 11 m/s. A aceleração (horizontal) é $a' = v'^2/R$, que possui uma componente paralela e uma componente perpendicular à superfície da estrada:

$$a_{\|} = a'\cos\theta = \frac{v'^2\cos\theta}{R}$$
$$a_{\perp} = a'\operatorname{sen}\theta = \frac{v'^2\operatorname{sen}\theta}{R}.$$

De acordo com a Segunda Lei de Newton (escolhendo um eixo paralelo à superfície da estrada, apontando para o centro da curva, como eixo x e um eixo perpendicular à superfície da estrada, apontando para cima, como eixo y), temos:

$$mg\operatorname{sen}\theta - f_s = ma_{\|}$$
$$F_N - mg\cos\theta = ma_{\perp}$$

o que nos dá

$$\frac{f_s}{F_N} = \frac{mg\operatorname{sen}\theta - mv'^2\cos\theta/R}{mg\cos\theta + mv'^2\operatorname{sen}\theta/R}.$$

Cancelando a massa e substituindo os valores numéricos, obtemos f_s/F_N = 0,078. Como o coeficiente de atrito pedido é o menor para o qual os carros não derrapam, $f_s = f_{s,\max}$ e μ_s = 0,078.

57. Para que o disco permaneça em repouso, o módulo da tensão T do fio deve ser igual ao peso Mg do cilindro. Como a tensão do fio é a força centrífuga que mantém o disco em uma trajetória circular, $T = mv^2/r$. Assim, $Mg = mv^2/r$. Explicitando a velocidade, temos:

$$v=\sqrt{\frac{Mgr}{m}}=\sqrt{\frac{(2{,}50\text{ kg})(9{,}80\text{ m/s}^2)(0{,}200\text{ m})}{1{,}50\text{ kg}}}=1{,}81\text{ m/s}.$$

58. (a) De acordo com a Eq. 2-16, a velocidade do carro é dada por $v^2=v_0^2+2ad$. Fazendo $v = 0$, $v_0 = 35$ m/s e $d = 107$ m, obtemos $a=-5{,}72\text{ m/s}^2$ como a aceleração mínima necessária para que o carro pare a tempo. Assim, a força de atrito mínima necessária para que o carro pare a tempo é

$$f=m|a|=(1400\text{ kg})(5{,}72\text{ m/s}^2)\approx 8{,}0\times10^3\text{ N}.$$

(b) O valor máximo possível do atrito estático é

$$f_{s,\,\text{máx}}=\mu_s mg=(0{,}50)(1400\text{ kg})(9{,}80\text{ m/s}^2)\approx 6{,}9\times10^3\text{ N}.$$

(c) Se $\mu_k=0{,}40$, $f_k=\mu_k mg$ e a aceleração é $a=-\mu_k g$. Assim, a velocidade com a qual o carro se choca com o muro é

$$v=\sqrt{v_0^2+2ad}=\sqrt{(35\text{ m/s})^2-2(0{,}40)(9{,}8\text{ m/s}^2)(107\text{ m})}\approx 20\text{ m/s ou }72\text{ km/h}.$$

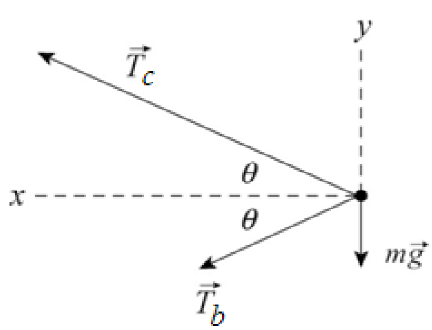
(d) A força necessária para que o carro descreva a trajetória circular que evitaria o choque é

$$F_r=\frac{mv_0^2}{r}=\frac{(1400\text{ kg})(35{,}0\text{ m/s})^2}{107\text{ m}}=1{,}6\times10^4\text{ N}.$$

(e) Como $F_r > f_{s,\,\text{máx}}$, a manobra não é possível.

59. PENSE Como mostra a Fig. 6-45, o problema envolve uma bola ligada por dois fios a uma haste giratória. Podemos analisar o sistema usando as equações do movimento circular uniforme.

FORMULE A figura a seguir mostra o diagrama de corpo livre da bola. $\vec{T}_c$ é a força que a corda de cima exerce sobre a bola, $\vec{T}_b$ é a força que a corda de baixo exerce sobre a bola, e m é a massa da bola. Note que a força da corda de cima deve ser maior que a da bola de baixo, já que ela deve equilibrar, além da força da corda de baixo, a força gravitacional a que a bola está submetida.



Vamos tomar o sentido positivo do eixo x como sendo para a direita (na direção do centro da órbita circular) e o sentido positivo do eixo y como sendo para cima. Uma vez que o módulo da aceleração é $a = v^2/R$, a aplicação da segunda lei de Newton à componente x do movimento nos dá

$$T_c\cos\theta+T_\ell\cos\theta=\frac{mv^2}{R}$$

em que v é a velocidade da bola, e R é o raio do movimento circular.

A aplicação da Segunda Lei de Newton à componente y do movimento circular nos dá

$$T_c \operatorname{sen}\theta - T_b \operatorname{sen}\theta - mg = 0$$

Explicitando T_b na segunda equação, obtemos $\vec{T}_b = T_a - mg/\operatorname{sen}\theta$.

ANALISE (a) Como, de acordo com os dados do problema, o triângulo formado pelas duas cordas e a distância entre os pontos em que estão presas à haste é equilátero, $\theta = 30{,}0°$; portanto,

$$T_b = T_c - \frac{mg}{\operatorname{sen}\theta} = 35{,}0\ \text{N} - \frac{(1{,}34\ \text{kg})(9{,}80\ \text{m/s}^2)}{\operatorname{sen} 30{,}0°} = 8{,}74\ \text{N}$$

(b) Como a força resultante na direção do eixo y é zero, o módulo da força resultante é dado por

$$F_{\text{res}} = (T_c + T_b)\cos\theta = (35{,}0\ \text{N} + 8{,}74\ \text{N})\cos 30{,}0° = 37{,}9\ \text{NN}$$

(c) O raio do movimento circular é

$$R = L\cos\theta = (1{,}70\ \text{m})\cos 30° = 1{,}47\ \text{m}$$

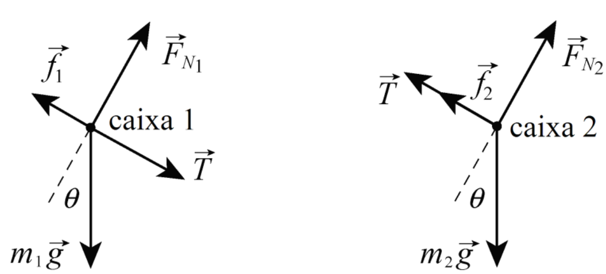
De acordo com a equação $F_{\text{res}} = mv^2/R$, a velocidade da bola é

$$v = \sqrt{\frac{RF_{\text{res}}}{m}} = \sqrt{\frac{(1{,}47\ \text{m})(37{,}9\ \text{N})}{1{,}34\ \text{kg}}} = 6{,}45\ \text{m/s}$$

(d) A força $\vec{F}_{\text{res}}$ aponta na direção do centro da órbita circular.

APRENDA Como a corda de cima está submetida a uma força cerca de quatro vezes maior que a corda de baixo ($T_c \approx 4T_b$), a probabilidade de que ela arrebente é maior.

60. A figura mostra os diagramas de corpo livre das duas caixas.



T é o módulo da força exercida sobre a haste (se $T > 0$, dizemos que a haste está sob tração; se $T < 0$, dizemos que a haste está sob compressão), $\vec{F}_{N2}$ é a força normal sobre a caixa 2 (a caixa com formigas pretas), $\vec{F}_{N1}$ é a força normal sobre a caixa 1 (a caixa com formigas vermelhas), $\vec{f}_1$ é a força de atrito cinético sobre a caixa 1, $\vec{f}_2$ é a força de atrito cinético sobre a caixa 2, m_1 é a massa da caixa 1 e m_2 é a massa da caixa 2.

Para cada bloco, escolhemos um eixo x encosta abaixo (na direção do canto inferior direito, nas figuras) e um eixo y na direção da força normal. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y das duas caixas, obtemos quatro equações:

$$m_2 g \operatorname{sen}\theta - f_2 - T = m_2\, a$$
$$F_{N2} - m_2 g \cos\theta = 0$$
$$m_1 g \operatorname{sen}\theta - f_1 + T = m_1 a$$
$$F_{N1} - m_1 g \cos\theta = 0$$

que, combinadas com a Eq. 6-2 ($f_k = \mu_k F_N$), descrevem totalmente a dinâmica do sistema.

(a) Resolvendo o sistema de equações acima, obtemos:

$$T=\left(\frac{m_2 m_1 g}{m_2+m_1}\right)(\mu_1-\mu_2)\cos\theta=1,05\ \text{N}.$$

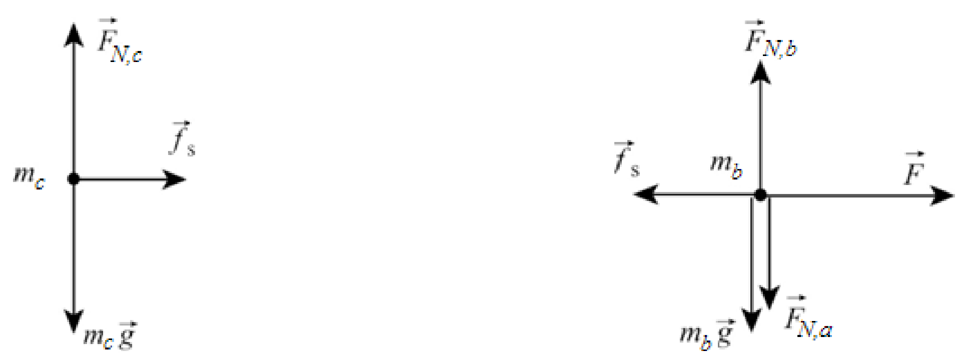
(b) A solução para a aceleração é

$$a=g\left[\operatorname{sen}\theta-\left(\frac{\mu_2 m_2+\mu_1 m_1}{m_2+m_1}\right)\cos\theta\right]=3,62\ \text{m/s}^2.$$

(c) Inverter a posição das caixas equivale a trocar os índices. A equação obtida no item (a) mostra que essa troca leva a um valor negativo para T, com o mesmo módulo de antes. Assim, a situação permanece a mesma, exceto pelo fato de que a haste passa a estar sob compressão e não sob tração, como na situação anterior.

61. PENSE O sistema é formado por dois blocos, um em cima do outro. Se empurrarmos o bloco de baixo com muita força, o bloco de cima deslizará. Estamos interessados em calcular a maior força que pode ser aplicada ao bloco de baixo, sem que os blocos deixem de se mover juntos.

FORMULE A figura que se segue mostra os diagramas de corpo livre dos dois blocos.



Em primeiro lugar, calculamos o coeficiente de atrito estático da superfície entre os dois blocos. Quando a força aplicada ao bloco de baixo é a maior possível, a força de atrito estático entre os dois blocos também deve ser a maior possível. Como uma força $F_c = 12$ N deve ser aplicada ao bloco de cima (com o bloco de baixo mantido fixo) para que o bloco de cima entre em movimento, usando as relações $F_c = f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_{N,c} = \mu_s m_c g$, obtemos

$$\mu_s=\frac{F_t}{m_t g}=\frac{12\ \text{N}}{(4,0\ \text{kg})(9,8\ \text{m/s}^2)}=0,31$$

Usando o mesmo raciocínio para a situação em que os dois blocos se movem juntos, obtemos

$$F=\mu_s(m_c+m_b)g$$

ANALISE (a) Substituindo μ_s pelo valor calculado anteriormente, obtemos

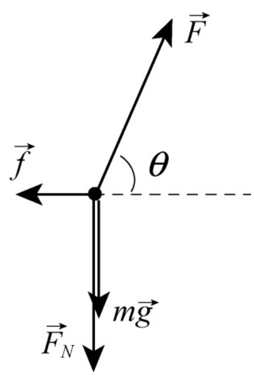
$$F=\mu_s(m_c+m_b)g=(0,31)(4,0\ \text{kg}+5,0\ \text{kg})(9,8\ \text{m/s}^2)=27\ \text{N}$$

(b) A aceleração máxima é

$$a_{\text{máx}}=\frac{F}{m_c+m_b}=\mu_s g=(0,31)(9,8\ \text{m/s}^2)=3,0\ \text{m/s}^2$$

APRENDA O bloco de cima começará a deslizar se a força aplicada exceder 27 N. Na ausência de atrito entre os blocos (ou seja, se $\mu_s = 0$), qualquer força aplicada ao bloco de baixo fará o bloco de cima deslizar.

62. O diagrama de corpo livre da pedra é mostrado na figura.



$\vec F$ é a força aplicada à pedra, $\vec F_N$ é a força normal *para baixo* que o teto exerce sobre a pedra, $m\vec g$ é a força de gravidade e $\vec f$ é a força de atrito. Escolhemos um eixo x para a direita e um eixo y para cima. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y, temos:

$$F_x = F\cos\theta - f = ma$$
$$F_y = F\,\text{sen}\,\theta - F_N - mg = 0$$

Como $f = \mu_k F_N$, e a segunda equação nos dá $F_N = F\,\text{sen}\,\theta - mg$,

$$f = \mu_k(F\,\text{sen}\,\theta - mg).$$

Substituindo essa expressão na primeira equação, obtemos

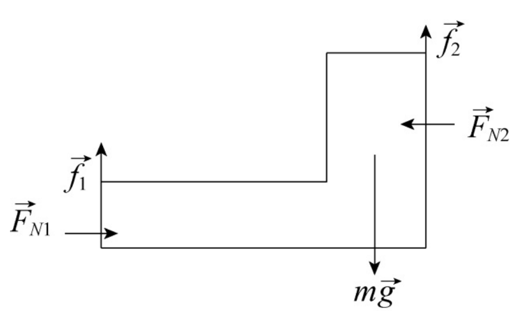
$$F\cos\theta - \mu_k(F\,\text{sen}\,\theta - mg) = ma.$$

Para $a = 0$, a força é

$$F = \frac{-\mu_k mg}{\cos\theta - \mu_k\,\text{sen}\,\theta}$$

Para $\mu_k = 0{,}65$, $m = 5{,}0$ kg e $\theta = 70°$, obtemos $F = 118$ N.

63. (a) A figura mostra o diagrama de corpo livre da alpinista (representada por um bloco em forma de L).



A força que a alpinista exerce sobre a pedra não é mostrada (já que o diagrama mostra apenas as forças que são exercidas sobre ela), mas está relacionada às forças normais $\vec F_{N1}$ e $\vec F_{N2}$ exercidas horizontalmente sobre os sapatos e sobre as costas da alpinista, respectivamente. Como vamos mostrar no item (b) que $F_{N1} = F_{N2}$, não está errado dizer que o módulo da força que a alpinista exerce sobre a pedra é F_{N2}. A força total para cima exercida pela força (máxima) de atrito estático é $\vec f = \vec f_1 + \vec f_2$, em que $f_1 = \mu_{s1}F_{N1}$ e $f_2 = \mu_{s2}F_{N2}$.

(b) Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y (x para a direita e y para cima), e como não há aceleração em nenhuma direção,

$$F_{N1} - F_{N2} = 0$$
$$f_1 + f_2 - mg = 0$$

De acordo com a primeira equação, as forças normais são iguais: $F_{N1} = F_{N2} = F_N$. Assim, de acordo com a Eq. 6-1,

$$f_1 = \mu_{s\,1} F_N$$
$$f_2 = \mu_{s\,2} F_N$$

e, portanto,

$$f_1 = \left(\frac{\mu_{s\,1}}{\mu_{s\,2}}\right) f_2 \,.$$

Assim, a segunda equação, $f_1 + f_2 - mg = 0$, nos dá

$$\left(\frac{\mu_{s\,1}}{\mu_{s\,2}} + 1\right) f_2 = mg$$

que (para $m = 49$ kg) nos dá $f_2 = 192$ N. Portanto, $F_N = f_2 / \mu_{s2} = 240\text{ N}$ é o módulo da força que a alpinista exerce sobre a pedra.

(c) De acordo com os cálculos acima, $f_1 = \mu_{s1} F_N = 288\text{ N}$, o que significa que

$$\frac{f_1}{P} = \frac{288}{(49)(9{,}8)} = 0{,}60,$$

ou seja, 60% do peso da alpinista é sustentado pelo atrito dos sapatos.

64. (a) A força para cima exercida pelo vagão sobre o passageiro é igual ao peso do passageiro; assim, a força resultante não possui uma componente vertical. Isso significa que a força resultante é igual à componente horizontal (força centrípeta). Assim,

$$\left|\vec{F}_{\text{res}}\right| = F = 210\text{ N}.$$

(b) De acordo com a Eq. 6-18, temos:

$$v = \sqrt{\frac{FR}{m}} = \sqrt{\frac{(210\text{ N})(470\text{ m})}{51{,}0\text{ kg}}} = 44{,}0\text{ m/s}.$$

65. A massa da camada de gelo é

$$m_{\text{gelo}} = \left(917\text{ kg/m}^3\right)\ (400\text{ m} \times 500\text{ m} \times 0{,}0040\text{ m}) = 7{,}34 \times 10^5\text{ kg}.$$

Somando a esse valor à massa de cem pedras (com 20 kg cada uma), obtemos $m = 7{,}36 \times 10^5$ kg.

(a) Fazendo $F = D$ (a força de arrasto), podemos usar a Eq. 6-14 para calcular a velocidade do vento em relação ao solo (na verdade, deveria ser a velocidade do vento em relação à pedra, mas a velocidade da pedra é tão pequena que a diferença é desprezível).

$$v = \sqrt{\frac{\mu_k mg}{4C_{\text{gelo}}\rho A_{\text{gelo}}}} = \sqrt{\frac{(0{,}10)\left(7{,}36 \times 10^5\text{ kg}\right)\left(9{,}8\text{ m/s}^2\right)}{4(0{,}002)\left(1{,}21\text{ kg/m}^3\right)\left(400 \times 500\text{ m}^2\right)}} = 19\text{ m/s} \approx 69\text{ km/h}.$$

(b) Multiplicando por 2 o resultado do item anterior, obtemos uma velocidade de 138 km/h.

(c) Sim, é razoável. O vento de um furacão da categoria 5 (a maior de todas) é da ordem de 260 km/h.

66. Como o coeficiente de atrito estático não é mencionado, concluímos que a força resultante é maior que $f_{s,\text{máx}}$. Aplicando a Segunda Lei de Newton ao eixo x dos blocos, que para o bloco 1 é positivo para a direita e para o bloco 2 é positivo encosta abaixo, obtemos:

$$T - f_k = m_1 a$$
$$m_2 g \operatorname{sen}\theta - T = m_2 a$$

Somando as equações, obtemos a aceleração:

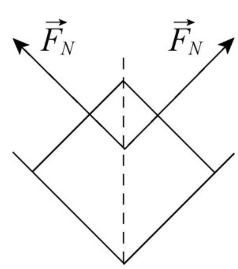
$$a = \frac{m_2 g \operatorname{sen}\theta - f_k}{m_1 + m_2}$$

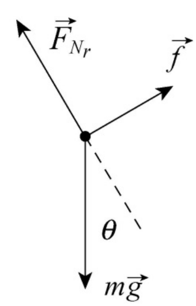
Para $f_k = \mu_k F_N = \mu_k m_1 g$, obtemos

$$a = \frac{(3,0 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)\operatorname{sen} 30° - (0,25)(2,0 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)}{3,0 \text{ kg} + 2,0 \text{ kg}} = 1,96 \text{ m/s}^2 .$$

Substituindo esse valor em uma das equações, obtemos $T = 8,8$ N.

67. Cada lado da vala exerce uma força normal sobre o caixote. A figura da esquerda mostra uma seção reta do conjunto.





A força resultante tem a direção na reta tracejada. Como as duas forças normais fazem um ângulo de 45° com a reta tracejada, o módulo da força resultante é

$$F_{Nr} = 2F_N \cos 45° = \sqrt{2} F_N .$$

A figura da direita é o diagrama de corpo livre do caixote. (Trata-se de uma vista "lateral", como a que é mostrada no desenho da esquerda da Fig. 6-51.) $\vec{F}_{N_r}$ é a força normal resultante, $m\vec{g}$ é a força da gravidade e $\vec{f}$ é a força de atrito. Escolhemos um eixo x encosta abaixo e um eixo y da direção de $\vec{F}_{Nr}$. Aplicando a Segunda Lei de Newton aos eixos x e y, temos:

$$x: \quad mg \operatorname{sen}\theta - f = ma$$
$$y: \quad F_{Nr} - mg\cos\theta = 0.$$

Como o caixote está em movimento, os dois lados da vala exercem uma força de atrito cinético, e o módulo da força de atrito resultante é dado por

$$f = 2\mu_k F_N = 2\mu_k F_{Nr}/\sqrt{2} = \sqrt{2}\mu_k F_{Nr}$$

Combinando essa expressão com $F_{Nr} = mg\cos\theta$ e substituindo na equação para o eixo x, obtemos

$$mg \operatorname{sen}\theta - \sqrt{2} mg \cos\theta = ma .$$

Assim, $a = g(\operatorname{sen}\theta - \sqrt{2}\mu_k \cos\theta)$.

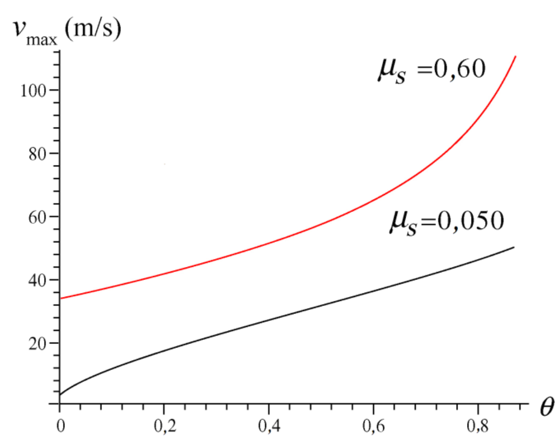
68. (a) Um carro está na iminência de derrapar quando a força de atrito estático atinge o valor máximo. Vamos considerar a soma vetorial $\vec{F}$ da força (máxima) de atrito com a força normal. Como as duas forças são mutuamente perpendiculares e seus módulos são proporcionais (Eq. 6-1), $\vec{F}$ faz um ângulo (com a *vertical*) $\phi = \theta + \theta_s$, em que $\tan\theta_s = \mu_s$ (compare com a Eq. 6-13) e θ é o ângulo de compensação da curva. Como a componente paralela ao plano da estrada da soma vetorial de $\vec{F}$ com a força da gravidade $m\vec{g}$ é a força centrípeta, cujo módulo é mv^2/R (Eq. 6-18), temos a seguinte relação:

$$\tan\phi = \frac{mv^2/R}{mg} = \frac{v_{\text{max}}^2}{Rg} \quad .$$

Explicitando $v_{\text{máx}}$, obtemos:

$$v_{\text{máx}} = \sqrt{Rg\tan(\theta + \tan^{-1}\mu_s)} = \sqrt{\frac{Rg(\tan\theta + \mu_s)}{1 - \mu_s\tan\theta}}$$

(b) A figura mostra o gráfico pedido (com θ em radianos):



(c) Usando a equação obtida no item (a) ou a curva de cima do item (b), obtemos v = 41,3 m/s = 149 km/h para μ_s = 0,60 e θ = 10° = 0,175 rad.

(d) Usando a equação obtida no item (a) ou a curva de baixo do item (b), obtemos v = 21,2 m/s = 76,2 km/h para μ_s = 0,050 e θ = 10° = 0,175 rad.

69. As forças verticais que agem sobre o bloco são a força normal exercida pelo teto, a força da gravidade e a componente vertical de $\vec{P}$. Como a aceleração da direção vertical é zero,

$$F_N = P\operatorname{sen}\theta - mg$$

e, portanto, o módulo da força de atrito cinético é dada por

$$f_k = \mu_k(P\operatorname{sen}\theta - mg).$$

Escolhendo um eixo x para a direita, a Segunda Lei de Newton nos dá

$$P\cos\ \theta - f_k = ma \;\Rightarrow\; a = \frac{P\cos\theta - u_k(P\operatorname{sen}\theta - mg)}{m}.$$

Fazendo θ = 70°, m = 5,0 kg e μ_k = 0,40, obtemos a = 3,4 m/s^2.

70. (a) Se o peso descreve uma circunferência de 0,94 m, a distância horizontal entre o peso e o eixo de rotação é dada por $R = 0{,}94/2\pi = 0{,}15$ m. O ângulo que a corda faz com a horizontal é

$$\theta = \cos^{-1}(R/L) = \cos^{-1}(0{,}15\text{ m}/0{,}90\text{ m}) = 80°.$$

A componente vertical da tensão da corda é $T \operatorname{sen}\theta$ e deve ser igual à força da gravidade mg. Assim,

$$T = \frac{mg}{\operatorname{sen}\theta} = 0{,}40\text{ N}.$$

Note que estamos usando T para representar a tensão da corda, e não o período do movimento.

(b) Como a componente horizontal da tensão da corda é a força centrípeta, cujo módulo é mv^2/R (Eq. 6-18), $T\cos\theta = mv^2/R$, o que nos dá $v = 0{,}49$ m/s. Dividindo o comprimento da circunferência pela velocidade, obtemos o período: 0,94/0,49 = 1,9 s.

71. (a) se o bloco está na iminência de deslizar, a força aplicada é igual à força máxima de atrito estático (Eq. 6-1, com $F_N = mg$ neste caso):

$$f_{s,\text{máx}} = \mu_s mg = 35{,}3\text{ N}.$$

(b) Neste caso, a força aplicada $\vec{F}$ reduz indiretamente o valor máximo da força de atrito (já que a componente vertical diminui a força normal) e se opõe diretamente à força de atrito (por causa da componente horizontal). Como a força normal é dada por

$$F_N = mg - F\operatorname{sen}\theta$$

a aplicação da Segunda Lei de Newton à direção horizontal nos dá

$$F\cos\theta - f_{s,\text{máx}} = F\cos\theta - \mu_s(mg - F\operatorname{sen}\theta) = 0 \quad \Rightarrow F = 39{,}7\text{ N}.$$

(c) Neste caso, a força aplicada $\vec{F}$ aumenta indiretamente o valor máximo da força de atrito (já que a componente vertical aumenta a força normal) e se opõe diretamente à força de atrito (por causa da componente horizontal). Como a força normal é dada por

$$F_N = mg + F\operatorname{sen}\theta,$$

a aplicação da Segunda Lei de Newton à direção horizontal nos dá

$$F\cos\theta - f_{s,\text{máx}} = F\cos\theta - \mu_s(mg + F\operatorname{sen}\theta) = 0 \quad \Rightarrow F = 320\text{ N}.$$

72. Aplicando a Segunda Lei de Newton à direção paralela à rampa e usando a Eq. 6-2 temos:

$$mg\operatorname{sen}\theta - f = ma,$$

$$f = f_k = \mu_k F_N = \mu_k mg\cos\theta$$

Assim,

$$a = 0{,}75\text{ m/s}^2 = g(\operatorname{sen}\theta - \mu_k\cos\theta)$$

o que, para $\theta = 40°$, nos dá $\mu_k = 0{,}74$.

73. (a) Aplicando a Segunda Lei de Newton a um eixo orientado “encosta abaixo”:

$$mg\operatorname{sen}\theta - f = ma$$

$$f = f_k = \mu_k F_N = \mu_k mg\cos\theta.$$

Assim,

$$a = g(\operatorname{sen}\theta - \mu_k\cos\theta) = 7{,}5\text{ m/s}^2.$$

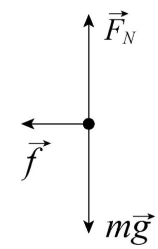
(b) O sentido da aceleração é para baixo.

(c) Nesse caso, a força de atrito aponta "encosta abaixo" (no sentido positivo do eixo escolhido) e a aceleração é

$$a = g(\text{sen}\theta + \mu_k \cos\theta\,) = 9{,}5 \text{ m/s}^2.$$

(d) O sentido da aceleração é para baixo.

74. A figura mostra o diagrama de corpo livre do disco. $\vec{F}_N$ é a força normal exercida pelo gelo, $\vec{f}$ é a força de atrito e $m\vec{g}$ é a força da gravidade. Escolhemos um eixo x apontando para a direita e um eixo y apontando para cima.



(a) Aplicando a Segunda Lei de Newton ao eixo x, obtemos $-f = ma$. Como a velocidade final é zero, a Eq. 2-16, $v^2 = v_0^2 + 2ax$, nos dá $a = -\,v_0^2/2x$.

Combinando os dois resultados, obtemos

$$f = \frac{mv_0^2}{2x} = \frac{(0{,}110 \text{ kg})(6{,}0 \text{ m/s})^2}{2(15 \text{ m})} = 0{,}13 \text{ N}.$$

(b) Aplicando a Segunda Lei de Newton ao eixo y, obtemos $F_N - mg = 0$ e, portanto, $F_N = mg$. Assim, de acordo com a Eq. 6-2, $f = \mu_k\, mg$. Explicitando μ_k, obtemos:

$$\mu_k = \frac{f}{mg} = \frac{0{,}13 \text{ N}}{(0{,}110 \text{ kg})(9{,}8 \text{ m/s}^2)} = 0{,}12\,.$$

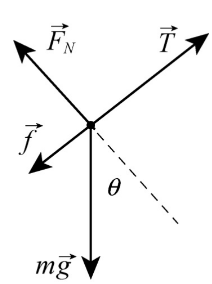
75. Podemos tratar os 25 vagões como um único objeto de massa $m = 25 \times 5{,}0 \times 10^4$ kg que (se a velocidade é 30 km/h = 8,3 m/s) está sujeito a uma força de atrito

$$f = 25 \times 250 \times 8{,}3 = 5{,}2 \times 10^4 \text{ N}.$$

(a) Em uma linha férrea plana, esse objeto experimenta uma força de tração T exercida pela locomotiva e, de acordo com a Segunda Lei de Newton,

$$T - f = ma \;\;\Rightarrow\;\; T = 5{,}2\times 10^4 + (1{,}25\times 10^6)(0{,}20) = 3{,}0\times 10^5 \text{ N}.$$

(b) A figura mostra o diagrama de corpo livre do conjunto de vagões, na qual θ é o ângulo de aclive. Escolhemos um eixo x encosta acima (na direção do canto superior direito da figura).



Aplicando a Segunda Lei de Newton ao eixo x, temos:

$$T - f - mg\,\text{sen}\,\theta = ma$$

Fazendo $a = 0$ e substituindo T, f e m por seus valores, obtemos $\theta = 1{,}2°$.

76. Este problema é conceitualmente análogo ao Problema 30. Usando o resultado do item (c) do Problema 30, temos:

$$\theta = \tan^{-1}\mu_s = \tan^{-1} 0{,}50 = 27°$$

e, portanto, o ângulo de *redução* deve ser, no mínimo,

$$\phi = 45° - 27° \approx 20°.$$

77. De acordo com a Eq. 6-16,

$$v_t = \sqrt{\frac{2mg}{C\rho\pi R^2}} = \sqrt{\frac{2(6)(9{,}8)}{(1{,}6)(1{,}2)\pi(0{,}03)^2}} = 147 \text{ m/s}$$

78. (a) O coeficiente de atrito estático é $\mu_s = \tan(\theta_{\text{máx}}) = 0{,}577 \approx 0{,}58$.

(b) Como

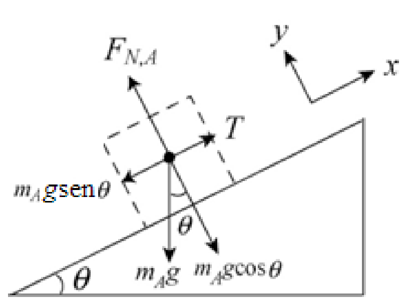
$$mg\,\text{sen}\theta - f = ma$$

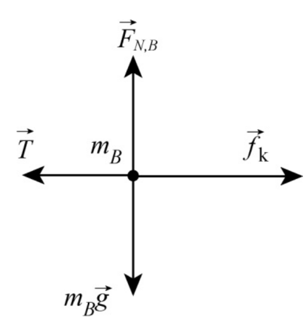
$$f = f_k = \mu_k F_N = \mu_k mg\cos\theta$$

e $a = 2d/t^2$ (com $d = 2{,}5$ m e $t = 4{,}0$ s), obtemos $\mu_k = 0{,}54$.

79. PENSE Este problema envolve dois blocos ligados por uma corda. O bloco A desce o plano inclinado arrastando o bloco B. A corda exerce uma força sobre o bloco A que depende da massa dos blocos e do coeficiente de atrito entre o bloco B e a superfície horizontal.

FORMULE A figura a seguir mostra os diagramas de corpo livre dos dois blocos.





Aplicando a segunda lei de Newton ao movimento do bloco A, temos

$$m_A g\,\text{sen}\,\theta - T = m_A a$$

Aplicando a segunda lei de Newton ao movimento do bloco B, temos

$$T - f_k = m_B a$$

em que $f_k = \mu_k F_{N,B} = \mu_k m_B g$. Combinando as equações do movimento dos blocos A e B, podemos determinar os valores de T, a tração da corda, e a, a aceleração dos blocos.

ANALISE (a) Combinando as equações anteriores e explicitando T, obtemos

$$T=\frac{m_A m_B}{m_A+m_B}(\operatorname{sen}\theta+\mu_k)g=\frac{(4{,}0\text{ kg})(2{,}0\text{ kg})}{4{,}0\text{ kg}+2{,}0\text{ kg}}(\operatorname{sen}30°+0{,}50)(9{,}80\text{ m/s}^2)=13\text{ N}$$

(b) A aceleração do sistema de dois blocos é dada por

$$a=\left(\frac{m_A\operatorname{sen}\theta-\mu_k m_B}{m_A+m_B}\right)g=\frac{(4{,}0\text{ kg})\operatorname{sen}30°-(0{,}50)(2{,}0\text{ kg})}{4{,}0\text{ kg}+2{,}0\text{ kg}}(9{,}80\text{ m/s}^2)=1{,}6\text{ m/s}^2$$

APRENDA Para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_k = 0$, o problema se torna o mesmo que foi discutido no Exemplo 5.03 do livro, e os valores da tração da corda e da aceleração se reduzem às expressões obtidas nesse exemplo, que são

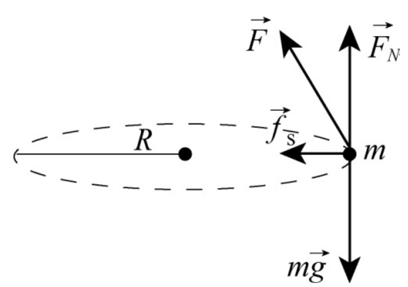
$$T=\frac{m_A m_B}{m_A+m_B}g,\quad a=\frac{m_A}{m_A+m_B}g$$

80. Usamos a Eq. 6-14, $D=\frac{1}{2}C\rho A v^2$, na qual ρ é a massa específica do ar, A é a área da seção reta do míssil, v é a velocidade do míssil e C é o coeficiente de arrasto. A área da seção reta é πR^2, na qual R = 0,265 m é o raio do míssil. Assim,

$$D=\frac{1}{2}(0{,}75)\left(1{,}2\text{ kg/m}^3\right)\pi\left(0{,}265\text{ m}\right)^2\left(250\text{ m/s}\right)^2=6{,}2\times10^3\text{ N.}$$

81. PENSE A força responsável pelo movimento circular do sistema ciclista-bicicleta é a força de atrito entre os pneus da bicicleta e o piso.

FORMULE A figura a seguir mostra o diagrama de corpo livre do sistema ciclista-bicicleta. O módulo da aceleração do sistema é dado por v^2/R, em que v é a velocidade do ciclista e R é o raio da curva.



Aplicando a segunda lei de Newton à componente horizontal do movimento, obtemos a equação $f_s = mv^2/R$, em que f_s é a força de atrito estático exercida pelo piso sobre os pneus da bicicleta. Aplicando a segunda lei de Newton à componente vertical do movimento, obtemos a equação $F_N = mg$ = 833 N, em que F_N é a força normal que o piso exerce sobre o sistema e mg é a soma do peso do ciclista com o peso da bicicleta.

ANALISE (a) A força de atrito é $f_s=\frac{mv^2}{R}=\frac{(85{,}0\text{ kg})(9{,}00\text{ m/s})^2}{25{,}0\text{ m}}=275\text{ N.}$

(b) De acordo com o teorema de Pitágoras, como a força de atrito $\vec{f}_s$ e a força normal $\vec{F}_N$ são mutuamente perpendiculares, a força resultante que o piso exerce sobre a bicicleta é

$$F=\sqrt{f_s^2+F_N^2}=\sqrt{(275\text{ N})^2+(833\text{ N})^2}=877\text{ N}$$

APRENDA A força que o piso exerce sobre a bicicleta faz um ângulo $\theta=\tan^{-1}(275\text{ N}/833\text{ N})=18{,}3^\circ$ com a vertical.

82. No alto do morro, as forças verticais que agem sobre o carro são a força normal exercida pela estrada e a força da gravidade. Escolhendo um eixo y orientado para baixo, a Segunda Lei de Newton nos dá

$$mg - F_N = \frac{mv^2}{R}$$

Fazendo $F_N = 0$ e explicitando v, temos:

$$v = \sqrt{gR} = \sqrt{(9{,}8\ \text{m/s}^2)(250\ \text{m})} = 49{,}5\ \text{m/s} = 49{,}5(3600/1000)\ \text{km/h} = 178\ \text{km/h}.$$

83. (a) A força mínima para que o caixote comece a se mover é $f_{s,\max} = \mu_s F_N$ (Eq. 6-1, com $F_N = mg$ neste caso), o que nos dá (0,51)(165 N) = 84,2 N.

(b) Depois que o caixote começa a se mover, a força necessária para mantê-lo em movimento com velocidade constante é uma força igual à força de atrito cinético $f_k = \mu_k F_N = \mu_k mg = 52{,}8$ N.

(c) Como a massa do caixote é 165/9,8 = 16,8 kg, a aceleração, usando a Segunda Lei de Newton e os resultados dos itens (a) e (b), é

$$a = (84{,}2\ \text{N} - 52{,}8\ \text{N})/(16{,}8\ \text{kg}) \approx 1{,}87\ \text{m/s}^2.$$

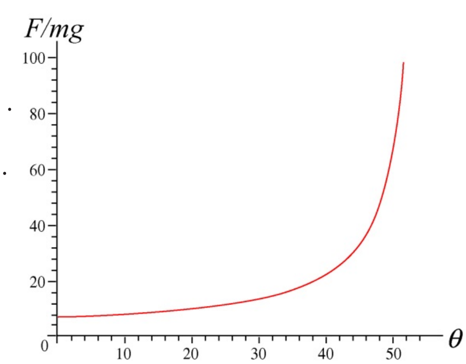
84. (a) A componente horizontal de $\vec{F}$ empurra o caixote, enquanto a componente vertical aumenta a força de atrito, ao aumentar a força normal. Aplicando a Segunda Lei de Newton nas direções, temos:

$$\text{direção horizontal: } F\cos\theta - f_s = 0$$

$$\text{direção vertical: } F_N - F\,\text{sen}\,\theta - mg = 0.$$

Dizer que o caixote está "na iminência de se mover" equivale a dizer que $f_s = f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N$ (Eq. 6-1). Combinando as três equações, obtemos

$$\frac{F}{mg} = \frac{\mu_s}{\cos\theta - \mu_s \,\text{sen}\,\theta}$$



A figura ao lado mostra um gráfico da razão F/mg em função de θ (com θ em graus).

(b) O denominador da expressão de F/mg em função de θ se anula para

$$\cos\theta - \mu_s \,\text{sen}\,\theta = 0 \quad \Rightarrow \quad \theta_{\text{inf}} = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\mu_s}\right)$$

Para $\mu_s = 0{,}70$, $\theta_{\text{inf}} = 55°$.

(c) Se o piso for lubrificado, o coeficiente de atrito estático será menor e, portanto, o ângulo θ_{inf} será maior que o valor calculado no item (b).

(d) Para $\mu_s = 0{,}60$, $\theta_{\text{inf}} = \tan^{-1}\left(\dfrac{1}{0{,}60}\right) = 59°$.

85. O carro começará a escorregar se

$$\mu_s = \tan\theta = \tan 35{,}0° = 0{,}700.$$

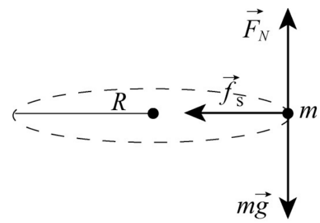
Este valor representa uma redução de 3,4% em relação ao valor inicial, 0,725.

86. (a) O problema é conceitualmente igual ao da roda-gigante (Problema 45), com a tensão T da corda assumindo o papel da força normal F_N. Assim, a tensão é dada por $T = m(g - v^2/r)$ no ponto mais alto do percurso e por $T = m(g + v^2/r)$ (o valor máximo) no ponto mais baixo do percurso. Isso significa que a corda vai arrebentar no ponto mais baixo do percurso.

(b) Quando a corda arrebenta, T = 33 N = $m(g + v^2/r)$, em que m = 0,26 kg e r = 0,65 m. Explicitando a velocidade, obtemos v = 8,73 m/s.

87. PENSE A força responsável pelo movimento circular do automóvel é a força de atrito entre os pneus e o piso.

FORMULE A figura mostra o diagrama de corpo livre do automóvel. A massa do automóvel é m = (10700/9,80) kg = $1{,}09 \times 10^3$ kg. A força normal é $F_N = mg$, e a força centrípeta necessária para manter o movimento circular é $f_s = mv^2/R$.



ANALISE (a) Para uma velocidade v = 13,4 m/s e um raio R = 61 m, temos

$$f_s = \frac{mv^2}{R} = \frac{(1{,}09\times10^3\ \text{kg})(13{,}4\ \text{m/s})^2}{61{,}0\ \text{m}} = 3{,}21\times10^3\ \text{N}$$

(b) De acordo com a Eq. 6-1, a força máxima de atrito estático é

$$f_{s,\text{máx}} = \mu_s mg = (0{,}35)(10700\ \text{N}) = 3{,}75\times10^3\ \text{N}$$

Como o valor calculado no item (a) é menor que este valor, concluímos que o carro consegue fazer a curva sem derrapar.

APRENDA De acordo com as expressões anteriores, se o coeficiente de atrito estático entre os pneus de um carro e o piso é μ_s, a velocidade máxima com a qual o carro consegue fazer uma curva de raio R sem derrapar é $v_{\text{máx}} = \sqrt{\mu_s gR}$. Na situação do problema, portanto, a velocidade máxima com a qual o carro pode fazer a curva sem derrapar é

$$v_{\text{máx}} = \sqrt{(0{,}35)(9{,}8\ \text{m/s}^2)(61\ \text{m})} = 14{,}5\ \text{m/s}$$

88. Aplicando a Segunda Lei de Newton ao bloco 2, temos:

$$\begin{aligned} F\cos\theta - T - f_k &= m_2 a \qquad \text{eixo } x \\ F_N - F\,\text{sen}\,\theta - m_2 g &= 0 \qquad \text{eixo } y \end{aligned}$$

Combinando essas equações com a relação $f_k = \mu_k F_N$, temos:

$$F(\cos\theta - \mu_k \text{sen}\theta) - T - \mu_k m_2 g = m_2 a$$

Aplicando a Segunda Lei de Newton ao bloco 1, temos:

$$\begin{aligned} T - f'_k &= m_1 a \qquad \text{eixo } x \\ F'_N - m_1 g &= 0 \qquad \text{eixo } y \end{aligned}$$

Combinando essas equações com a relação $f_k = \mu_k F'_N$, temos:

$$T - \mu_k m_1 g = m_1 a$$

Explicitando a na equação acima, substituindo na equação do bloco 2 e explicitando T, obtemos:

$$T = \frac{m_1(\cos\theta - \mu_k \text{sen}\,\theta)}{m_1 + m_2},\ F = \frac{(2{,}0\ \text{kg})[\cos 35° - (0{,}20)\,\text{sen}\,35°]}{2{,}0\ \text{kg} + 1{,}0\ \text{kg}}(20\ \text{N}) = 9{,}4\ \text{N}.$$

89. PENSE Para deslocar um armário, é preciso que a força aplicada seja maior que a força de atrito.

FORMULE Podemos aplicar ao problema a segunda lei de Newton, na forma $F_{ap} - f = ma$. Se a força aplicada F_{ap} for menor ou igual à força máxima de atrito estático $f_{s,\text{máx}}$, a conclusão será "o armário não se move", caso em que $a = 0$ e $f = F_{ap}$. Se, por outro lado, $F_{ap} > f_{s,\text{máx}}$, a conclusão será "o armário se move", caso em que $a > 0$ e $f = f_k$, em que f_k é a força de atrito cinético. Para determinar os valores de $f_{s,\text{máx}}$ e f_k, podemos usar as Eqs. 6-1 e 6-2, tomando como força normal o peso do armário. A força máxima de atrito estático é

$$f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N = \mu_s mg = (0{,}68)(556\ \text{N}) = 378\ \text{N}$$

e a força máxima de atrito cinético é

$$f_k = \mu_k F_N = \mu_k mg = (0{,}56)(556\ \text{N}) = 311\ \text{N}$$

ANALISE (a) Para $F_{ap} = 220$ N, $F_{ap} < f_{s,\text{máx}}$ e, portanto, $f = F_{ap} = 222$ N. O armário não se move.

(b) Para $F_{ap} = 334$ N, $F_{ap} < f_{s,\text{máx}}$ e, portanto, $f = F_{ap} = 334$ N. O armário não se move.

(c) Para $F_{ap} = 445$ N, $F_{ap} > f_{s,\text{máx}}$ e, portanto, $f = f_k = 311$ N.

(d) Para $F_{ap} = 456$ N, $F_{ap} > f_{s,\text{máx}}$ e, portanto, $f = f_k = 311$ N.

(e) O armário se move nas tentativas dos itens (c) e (d).

APRENDA Para que o armário se mova, é preciso que a força aplicada seja maior que a força máxima de atrito estático, $f_{s,\text{máx}}$.

90. Analisando as forças na direção horizontal (na qual não há aceleração), chegamos à conclusão de que $F = F_N$, ou seja, $F_N = 60$ N. A força máxima de atrito estático é, portanto, $f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N = 33$ N e a força de atrito cinético (se o bloco estiver em movimento) é $f_k = \mu_k F_N = 23$ N.

(a) Nesse caso, $\vec{P} = 34$ N para cima. Supondo que $\vec{f}$ aponta para baixo, a aplicação da Segunda Lei de Newton à direção vertical nos dá

$$P - mg - f = ma.$$

Supondo que $a = 0$, $f = (34 - 22)$ N = 12 N. Como $f < f_{s,\text{máx}}$, a hipótese de que $a = 0$ está correta e a força de atrito é $\vec{f_s} = 12$ N, para baixo. Como foi pedido apenas o módulo da força, a resposta é 12 N.

(b) Nesse caso, $\vec{P} = 12$ N para cima. Supondo que $\vec{f}$ aponta para baixo e que $a = 0$, $f = (12 - 22)$ N = −10 N. Como $|f_s| < f_{s,\text{máx}}$, a hipótese de que $a = 0$ está correta, mas o fato de obtermos um valor negativo para f mostra que a hipótese de que $\vec{f}$ aponta para baixo está errada. Assim, a força de atrito é $\vec{f_s} = 10$ N, para cima. Como foi pedido apenas o módulo da força, a resposta é 10 N.

(c) Nesse caso, $\vec{P} = 48$ N para cima. Supondo que $\vec{f}$ aponta para baixo e que $a = 0$, $f = (48 - 22)$ N = 26 N. Como $f_s < f_{s,\text{máx}}$, a hipótese de que $a = 0$ está correta e, como obtivemos um valor positivo para f, a hipótese de que $\vec{f}$ aponta para baixo também está correta. Assim, a força de atrito é $\vec{f_s} = 26$ N, para baixo. Como foi pedido apenas o módulo da força, a resposta é 26 N.

(d) Nesse caso, $\vec{P} = 62$ N para cima. Supondo que $\vec{f}$ aponta para baixo e que $a = 0$, $f = (62 - 22)$ N = 40 N. Como $f > f_{s,\text{máx}}$, a hipótese de que $a = 0$ não está correta. Como $a \neq 0$, $f = f_k$ e como a diferença entre a força vertical e o peso é positiva, a aceleração aponta para cima e a hipótese de que $\vec{f}$ aponta para baixo está correta. Assim, a força de atrito é $\vec{f_k} = 23$ N, para baixo. Como foi pedido apenas o módulo da força, a resposta é 23 N.

(e) Nesse caso, $\vec{P} = 10$ N para baixo. Supondo que $\vec{f}$ aponta para baixo, $f = (-10 - 22)$ N = −32 N. Como $|f_s| < f_{s,\text{máx}}$, a hipótese de que $a = 0$ está correta, mas o fato de obtermos um valor negativo para f mostra que a hipótese de que $\vec{f}$ aponta para baixo está errada. Assim, a força de atrito é $\vec{f_s} = 32$ N, para cima. Como foi pedido apenas o módulo da força, a resposta é 32 N.

(f) Nesse caso, $\vec{P} = 18$ N para baixo. Supondo que $\vec{f}$ aponta para baixo, $f = (-18 - 22)$ N = −40 N. Como $|f| > f_{s,\text{máx}}$, a hipótese de que $a = 0$ não está correta. Como $a \neq 0$, $f = f_k$ e, como a força vertical e o peso apontam para baixo, a aceleração aponta para baixo, e a hipótese de que $\vec{f}$ aponta para baixo está errada. Assim, a força de atrito é $\vec{f_k} = 23$ N, para cima. Como foi pedido apenas o módulo da força, a resposta é 23 N.

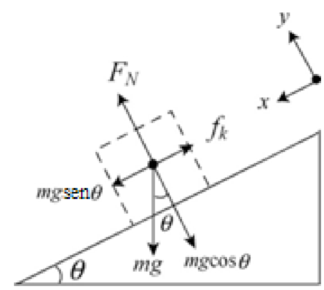
(g) O bloco se move para cima no caso do item (d).

(h) O bloco se move para baixo no caso do item (f).

(i) A força de atrito é para baixo nos casos dos itens (a), (c) e (d).

91. PENSE A força de atrito tem sempre o sentido contrário ao do movimento do bloco.

FORMULE A figura a seguir mostra o diagrama de corpo livre do bloco na situação da primeira parte do problema, em que o bloco está escorregando para baixo com velocidade constante.



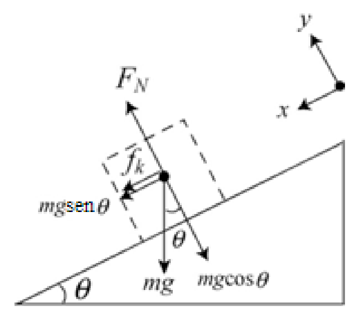
De acordo com a segunda lei de Newton,

$$mg\,\text{sen}\,\theta - f_k = mg\,\text{sen}\,\theta - \mu_k F_N = ma_x = 0$$
$$mg\cos\theta - F_N = ma_y = 0$$

Combinando as duas equações, obtemos a relação

$$\mu_k = \tan\theta$$

A figura mostra o diagrama de corpo livre do bloco na situação da segunda parte do problema, em que o bloco está subindo. De acordo com a segunda lei de Newton e a Eq. 6-12,



$$mg\,\text{sen}\,\theta + f_k = mg\,\text{sen}\,\theta + \mu_k F_N = ma_x$$
$$mg\cos\theta - F_N = ma_y = 0$$

Note que, de acordo com os sentidos escolhidos para os eixos, o fato de que $a_x > 0$ significa que a aceleração aponta para baixo e, portanto, a velocidade do bloco diminui com o tempo.

ANALISE (a) Usando as relações $\mu_k = \tan\theta$ e $F_N = mg\cos\theta$, obtemos a aceleração a_x do bloco paralelamente à superfície do plano inclinado:

$$a_x = g\,\text{sen}\,\theta + \frac{\mu_k F_N}{m} = g\,\text{sen}\,\theta + \frac{(\tan\theta)(mg\cos\theta)}{m} = 2g\,\text{sen}\,\theta$$

A distância que o bloco percorre até parar pode ser determinada usando a Eq. 2-16, $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$, que nos dá

$$\Delta x = \frac{v_0^2}{2a_x} = \frac{v_0^2}{2(2g\,\text{sen}\,\theta)} = \frac{v_0^2}{4g\,\text{sen}\,\theta}$$

em que $\Delta x = x - x_0$.

(b) Como foi visto no Módulo 6-1, normalmente $\mu_s > \mu_k$. O ângulo de repouso (maior ângulo de inclinação do plano inclinado para o qual um bloco em repouso não escorrega para baixo) é dado por $\mu_s = \tan(\theta_{\text{repouso}})$. Assim, esperamos que $\theta_{\text{repouso}} > \theta$ e, portanto, que o bloco não volte a escorregar para baixo depois de parar.

APRENDA Outra forma de mostrar que o bloco não volta a escorregar depois de parar é notar que a componente da força gravitacional ao longo do plano inclinado é menor que a força de atrito, ou seja, que $mg\,\text{sen}\,\theta = f_k < f_{s,\text{máx}}$.

92. Suponha que o carro está "na iminência de derrapar", ou seja, que a força de atrito estático está com o valor máximo. Vamos primeiro considerar a soma vetorial $\vec{F}$ da força (máxima) de atrito estático com a força normal. Como a força de atrito e a força normal são mutuamente perpendiculares e têm módulos proporcionais (Eq. 6-1), o ângulo da força $\vec{F}$ com a vertical é $\phi = \theta + \theta_s$, na qual $\tan\theta_s = \mu_s$ (veja a Eq. 6-13) e θ é o ângulo de compensação. Como a componente horizontal da força $\vec{F}$ deve ser igual à força centrípeta (mv^2/R) e a componente vertical deve ser igual à força da gravidade (mg), chegamos a uma relação surpreendentemente simples:

$$\tan\phi = \frac{mv_{\max}^2/R}{mg} = \frac{v_{\max}^2}{Rg},$$

o que nos dá

$$v_{\max} = \sqrt{Rg\tan(\theta + \tan^{-1}\mu_s)} = \sqrt{\frac{Rg(\tan\theta + \mu_s)}{1 - \mu_s\tan\theta}}.$$

(a) Para que os carros não “dependam” do atrito estático para não derrapar, a componente da força da gravidade paralela à estrada deve ser suficiente para proporcionar a aceleração centrípeta necessária. Para determinar o ângulo mínimo para que isso aconteça, basta fazer $\mu_s = 0$ na equação acima, o que nos dá $v_{\text{máx}} = \sqrt{Rg\tan\theta}$. Para $v_{\text{máx}} = 60$ km/h = 16,67 m/s e $R = 150$ m, obtemos $\theta = 11°$.

(b) Por outro lado, se a curva não é compensada, $\theta = 0$ e a equação acima se torna

$$v_{\text{máx}} = \sqrt{Rg\mu_s}$$

Para $v_{\text{máx}} = 60$ km/h = 16,67 m/s e $R = 150$ m, obtemos $\mu_s = 0{,}19$.

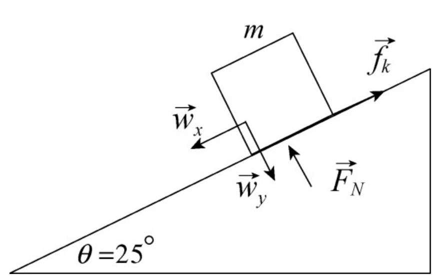
93. (a) Como a caixa não se move até o instante $t = 2{,}8$ s, no qual o módulo da força aplicada atinge o valor $F = (1{,}8)(2{,}8) = 5{,}0$ N, isso significa que $f_{s,\text{máx}} = 5{,}0$ N. Sabemos também que o módulo da força normal é igual ao peso da caixa: $F_N = mg = 15$ N. Assim, $\mu_s = f_{s,\text{máx}}/F_N = 0{,}34$.

(b) Aplicando a Segunda Lei de Newton ao eixo horizontal (e tomando como sentido positivo o sentido do movimento), temos:

$$F - f_k = ma \;\Rightarrow\; 1{,}8t - f_k = (1{,}5)(1{,}2t - 2{,}4)$$

O que nos dá $f_k = 3{,}6$ N. Assim, $\mu_k = f_k / F_N = 0{,}24$.

94. Na figura a seguir, $m = 140/9{,}8 = 14{,}3$ kg é a massa da criança. Chamamos de $\vec{w}_x$ e $\vec{w}_y$ as componentes da força gravitacional que a Terra exerce sobre a criança; os módulos dessas componentes são $w_x = mg$ sen θ e $w_y = mg\cos\theta$.



(a) Aplicando a Segunda Lei de Newton à direção paralela à superfície do escorrega, e tomando o sentido positivo como sendo para cima (de modo que $a = -0{,}86$ m/s^2), temos:

$$f_k - 140\,\text{sen}\,25° = m(-0{,}86)$$

o que nos dá $f_k = 47$ N.

Aplicando a Segunda Lei de Newton à direção perpendicular à superfície do escorrega, temos:

$$F_N - 140\cos 25° = 0 \quad\Rightarrow\quad F_N = 127\text{ N}.$$

Assim, $\mu_k = f_k/F_N = 0{,}37$.

(b) Voltando à primeira equação do item (a), vemos que, se a componente do peso paralela à superfície do escorrega não fosse suficiente para vencer o atrito estático, a criança não escorregaria. Isso significa que 140 sen 25° $> f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N$, o que nos dá tan 25° = 0,47 $> \mu_s$. O valor máximo μ_s é, portanto, 0,47. O fato de que o valor mínimo de μ_s é μ_k é mais sutil; talvez seja conveniente reler a Seção 6-2 do livro. Se μ_k fosse maior que μ_s, a criança não poderia começar a se mover quando o atrito estático fosse superado (aumentando o ângulo do escorrega), já que o atrito se tornaria maior que o necessário para mantê-la em repouso! Os limites de μ_s são, portanto, 0,47 $> \mu_s >$ 0,37.

95. (a) A componente horizontal de $\vec{F}$ é responsável pelo movimento do esfregão, enquanto a componente vertical aumenta a força de atrito, ao aumentar a força normal. Aplicando a Segunda Lei de Newton à direção vertical, temos $F_N - F\cos\theta - mg = 0$; aplicando a Segunda Lei de Newton à direção horizontal, temos $F \operatorname{sen}\theta - f_k = 0$ (já que o esfregão, de acordo com o enunciado do problema, está se movendo com velocidade constante). Além disso, de acordo com a Eq. 6-2, $f_k = \mu_k F_N$. Combinando essas equações, obtemos

$$F = \frac{\mu_k mg}{\operatorname{sen}\theta - \mu_k \cos\theta}\,.$$

(b) O pano de chão não poderá se mover se a componente horizontal de F for menor que a força máxima de atrito estático, $f_{s,\text{máx}}$. Isso significa que a condição limite é $F \operatorname{sen}\theta = f_{s,\text{máx}}$. Combinando essa equação com a Eq. 6-1 e com a equação de equilíbrio na direção vertical, $F_N - F\cos\theta - mg = 0$, temos:

$$F = \frac{\mu_s mg}{\operatorname{sen}\theta - \mu_s \cos\theta}$$

Como o denominador dessa equação se anula para $\mu_s = \tan\theta$, isso significa que o ângulo limite é $\mu_0 = \tan \quad \mu_s$; para $\theta < \theta_0$, o pano de chão permanecerá em repouso.

96. (a) A distância percorrida em uma revolução do carrossel é $2\pi R = 2\pi(4{,}6\text{ m}) = 29$ m. A velocidade (supostamente constante) é, portanto, $v = (29\text{ m})/(30\text{ s}) = 0{,}96$ m/s.

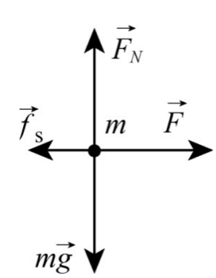
(b) A Segunda Lei de Newton (usando a Eq. 6-17 para o módulo da aceleração) nos dá

$$f_s = m\left(\frac{v^2}{R}\right) = m(0{,}20)$$

De acordo com a Eq. 6-1, como $F_N = mg$, o valor máximo do atrito estático é $f_{s,\text{máx}} = \mu_s mg$. Igualando este valor a $f_s = m(0{,}20)$, podemos cancelar as massas e obter como resultado $\mu_s = 0{,}20/9{,}8 = 0{,}021$.

97. PENSE Neste problema, uma força é usada para acelerar uma caixa. Conhecendo a distância percorrida e a velocidade no final do percurso, podemos calcular o coeficiente de atrito cinético entre a caixa e o piso.

FORMULE A figura mostra o diagrama de corpo livre da caixa. Vamos tomar o sentido positivo do eixo x como sendo para a direita, o sentido positivo do eixo y como sendo para cima, e chamar de F o módulo da força



aplicada pelo operário. Aplicando a segunda lei de Newton ao movimento segundo os eixos x e y, obtemos, respectivamente, as equações

$$F - f_k = ma_x, \qquad F_N - mg = 0$$

Por outro lado, usando a Eq. 2-16, $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$, obtemos

$$a_x = \frac{v^2 - v_0^2}{2\Delta x} = \frac{(1,0 \text{ m/s})^2 - 0}{2(1,4 \text{ m})} = 0,357 \text{ m/s}^2$$

em que $\Delta x = x - x_0$.

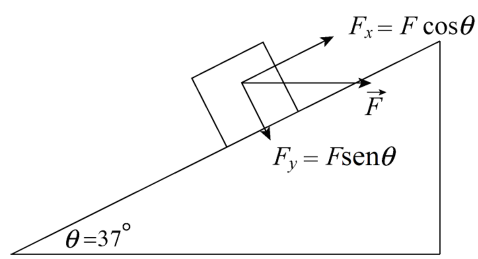
Combinando essas equações, podemos determinar o valor de μ_k.

ANALISE Explicitando μ_k na Eq. 6-2, $f_k = \mu_k F_N$, obtemos

$$\mu_k = \frac{f_k}{F_N} = \frac{F - ma_x}{mg} = \frac{85 \text{ N} - (40 \text{ kg})(0,357 \text{ m/s}^2)}{(40 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)} = 0,18$$

APRENDA Escrevendo a aceleração na forma $a_x = (F/m) - \mu_k g$, vemos que o valor da aceleração aumenta quando μ_k diminui. Se o atrito for desprezível, ou seja, se $\mu_k = 0$, $a_x = F/m$.

98. A figura mostra as componentes da força F nas direções paralela e perpendicular ao plano inclinado.



(a) Aplicando a Segunda Lei de Newton às direções paralela e perpendicular à superfície do plano inclinado, temos:

$$F\cos\theta - f_k - mg\,\text{sen}\,\theta = ma$$
$$F_N - F\,\text{sen}\,\theta - mg\cos\theta = 0.$$

Usando a relação $f_k = \mu_k F_N$, essas equações nos dão

$$a = \frac{F}{m}(\cos\theta - \mu_k \text{sen}\theta) - g(\text{sen}\theta + \mu_k \cos\theta).$$

Fazendo $\mu_k = 0,30$, $F = 50$ N e $m = 5,0$ kg, obtemos $a = -2,1$ m/s^2 ou $|a| = 2,1$ m/s^2.

(b) O sentido de $\vec{a}$ é para baixo.

(c) Para $v_0 = +4,0$ m/s e $v = 0$, a Eq. 2-16 nos dá $\Delta x = -\dfrac{(4,0 \text{ m/s})^2}{2(-2,1 \text{ m/s}^2)} = 3,9$ m.

(d) Esperamos que $\mu_s \le \mu_k$; caso contrário, um objeto que começasse a se mover imediatamente começaria a ser freado (antes mesmo de ganhar velocidade)! No caso limite, em que $\mu_s = \mu_k = 0,30$, o máximo atrito estático, de acordo com a Eq. 6-1, seria

$$f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N = \mu_s (F\,\text{sen}\,\theta + mg\cos\theta) = 21 \text{ N}$$

Acontece que, para que a aceleração ao longo do eixo x seja nula, devemos ter

$$f_s = F\cos\theta - mg\,\text{sen}\,\theta = 10 \text{ N}$$

Como o valor de f_s necessário para que o bloco permaneça em repouso é menor que $f_{s,\text{máx}}$, o bloco permanece em repouso.

99. (a) Como, nesta situação, $F_N = mg$,

$$f_{s,\text{máx}} = \mu_s mg = (0{,}52)(11 \text{ kg})(9{,}8 \text{ m/s}^2) = 56 \text{ N}$$

Assim, o módulo da força horizontal que coloca o bloco na iminência de se mover é 56 N.

(b) Aplicando a Segunda Lei de Newton à componente vertical do movimento, obtemos

$$F\,\text{sen}\,\theta + F_N = mg \;\Rightarrow\; f_{s,\text{máx}} = \mu_s(mg - F\,\text{sen}\,\theta)$$

Assim, a componente horizontal da força que coloca o bloco na iminência de se mover é

$$F\cos\theta = \mu_s(mg - F\,\text{sen}\,\theta) \;\Rightarrow\; F = \frac{\mu_s mg}{\cos\theta + \mu_s\,\text{sen}\,\theta}$$

o que nos dá $F = 59$ N para $\theta = 60°$.

(c) Fazendo $\theta = -60°$, obtemos

$$F = \frac{(0{,}52)(11\text{ kg})(9{,}8\text{ m/s}^2)}{\cos(-60°) + (0{,}52)\,\text{sen}\,(-60°)} = 1{,}1\times 10^3 \text{ N}$$

100. (a) Se, partindo do repouso com uma aceleração constante a, o esquiador percorre uma distância L em um intervalo de tempo t, $L = at^2/2$. Explicitando a e substituindo L e t por seus valores para os esquis convencionais, obtemos

$$a_1 = \frac{2L}{t_1^2} = \frac{2(200\text{ m})}{(61\text{ s})^2} = 0{,}11 \text{ m/s}^2$$

(b) No caso dos novos esquis, temos

$$a_2 = \frac{2L}{t_2^2} = \frac{2(200\text{ m})}{(42\text{ s})^2} = 0{,}23 \text{ m/s}^2$$

(c) A força resultante na direção da encosta para um esquiador de massa m é

$$F_{\text{res}} = mg\,\text{sen}\,\theta - f_k = mg(\text{sen}\,\theta - \mu_k\cos\theta) = ma$$

o que nos dá, para os esquis convencionais,

$$\mu_{k1} = \tan\theta - \frac{a_1}{g\cos\theta} = \tan 3{,}0° - \frac{0{,}11\text{ m/s}^2}{(9{,}8\text{ m/s}^2)\cos 3{,}0°} = 0{,}041$$

(d) No caso dos novos esquis, temos

$$\mu_{k2} = \tan\theta - \frac{a_2}{g\cos\theta} = \tan 3{,}0° - \frac{0{,}23\text{ m/s}^2}{(9{,}8\text{ m/s}^2)\cos 3{,}0°} = 0{,}029$$

101. Vamos tomar como positivo o sentido "para baixo" do eixo vertical. A aplicação da segunda lei de Newton à componente vertical do movimento da criança nos dá

$$mg\,\text{sen}\,\theta - f_k = ma$$

De acordo com a Eq. 6-2,

$$f_k = \mu_k F_N = \mu_k m g$$

Portanto, $a = g(\text{sen}\,\theta - m_k \cos\theta) = -0{,}5$ m/s^2 (note que, como a aceleração e a velocidade da criança têm sentidos opostos, a velocidade diminui com o tempo). Explicitando o coeficiente de atrito cinético e substituindo os valores conhecidos, obtemos $\mu_k = 0{,}76$.

102. (a) Vamos escolher os sentidos do eixo x (horizontal) e do eixo y (vertical) para que as componentes da força $\vec{F}$ sejam positivas. Nesse caso, $F_x = F_h = F\cos\theta = 100$ N.

(b) Como a aceleração vertical é nula, a aplicação da segunda lei de Newton à componente y do movimento nos dá

$$F_N + F_y = mg \Rightarrow F_N = mg - F\,\text{sen}\,\theta$$

em que $m = 25{,}0$ kg. Para $\theta = 0°$, essa equação nos dá $F_N = 245$ N.

(c) Para $\theta = 30{,}0°$, $F_x = F_h = F\cos\theta = 86{,}6$ N.

(d) Para $\theta = 30{,}0°$, $F_N = mg - F\,\text{sen}\,\theta = 195$ N.

(e) Para $\theta = 60{,}0°$, $F_x = F_h = F\cos\theta = 50{,}0$ N.

(f) Para $\theta = 60{,}0°$, $F_N = mg - F\,\text{sen}\,\theta = 158$ N.

(g) A condição para que a cadeira escorregue é

$$F_x > f_{s,\text{máx}} = \mu_s F_N \text{ em que } \mu_s = 0{,}42$$

Para $\theta = 0°$, temos

$$F_x = 100 \text{ N} < f_{s,\text{máx}} = (0{,}42)(245 \text{ N}) = 103 \text{ N}$$

Portanto, a cadeira permanece em repouso.

(h) Para $\theta = 30{,}0°$, $F_x = 86{,}6 \text{ N} > f_{s,\text{máx}} = (0{,}42)(195 \text{ N}) = 81{,}9$ N; portanto, a cadeira escorrega.

(i) Para $\theta = 60{,}0°$, $F_x = 50{,}0 \text{ N} > f_{s,\text{máx}} = (0{,}42)(158 \text{ N}) = 66{,}4$ N; portanto, a cadeira permanece em repouso.

103. (a) A tração da corda é máxima no ponto mais baixo do percurso, pois, nesse ponto, a tração da corda e a força gravitacional atuam sobre a corda na mesma direção e em sentidos opostos.

(b) O valor da tração da corda nesse ponto da trajetória pode ser obtido combinando a segunda lei de Newton com a Eq. 6-18:

$$T - mg = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow T = m\left(g + \frac{v^2}{R}\right)$$

Explicitando a velocidade na equação anterior, obtemos

$$v = \sqrt{R\left(\frac{T}{m} - g\right)} = \sqrt{(0{,}91 \text{ m})\left(\frac{40 \text{ N}}{0{,}37 \text{ kg}} - 9{,}8 \text{ m/s}^2\right)}$$

o que nos dá $v = 9{,}5$ m/s.

104. (a) A componente do peso paralela à encosta (tomando como positivo o sentido "para baixo") é $mg\,\text{sen}\,\theta$. Aplicando a segunda lei de Newton à componente do movimento paralela à encosta, obtemos a relação $mg\,\text{sen}\,\theta - f = ma$. Explicitando a e substituindo os parâmetros pelos seus valores, obtemos $a = 1{,}64$ m/s^2. De acordo com a Eq. 2-15,

$$80{,}0\ \text{m} = \left(6{,}20\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) t + \frac{1}{2}\left(1{,}64\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) t^2$$

Aplicando a fórmula de Báskara à equação anterior e escolhendo a raiz positiva, obtemos t = 6,80 s.

(b) Se executarmos os mesmos cálculos do item (a) para f = 42,0 N, em vez de f = 62,0 N, vamos obter t = 6,76 s.

105. A componente do peso paralela à rampa (tomando como positivo o sentido "para cima") é $P\,\text{sen}\,\theta$, em que P é o peso do bloco. Aplicando a segunda lei de Newton à componente do movimento paralela à encosta e usando a Eq. 5-12, obtemos a relação

$$f_k - P\cos\theta = aP/g$$

Explicitando f_k e substituindo os parâmetros pelos seus valores, obtemos f_k = 20 N.

Aplicando a segunda lei de Newton à componente do movimento perpendicular à encosta, obtemos

$$F_N = P\cos\theta = (40)(0{,}9) = 36\ \text{N}\,.$$

Assim, de acordo com a Eq. 6-2,

$$\mu_k = \frac{f_k}{F_N} = 0{,}56\,.$$