APLICACIÓN DE LAS LEYES DE NEWTON

5

Las aves planean aprovechando la primera y tercera leyes de Newton. Las alas empujan hacia abajo el aire cuando éste fluye por el cuerpo del ave, y el aire reacciona empujando las alas hacia arriba con una fuerza, —llamada *sustentación*— de igual magnitud y dirección opuesta. En un planeo estable, las fuerzas aerodinámicas sobre el ave equilibran exactamente la fuerza hacia abajo de la gravedad, así que la fuerza neta externa sobre el ave es cero.

? **Suponga que el ave entra en una corriente de aire que asciende con rapidez constante. En esta situación, ¿qué tiene mayor magnitud: la fuerza de gravedad o las fuerzas aerodinámicas?**

Ya vimos en el capítulo 4 que las tres leyes del movimiento de Newton, cimientos de la mecánica clásica, tienen un planteamiento muy sencillo, pero su *aplicación* a situaciones como un velero para hielo que patina sobre un lago congelado, un tobogán que se desliza colina abajo o un avión a reacción que efectúa una vuelta cerrada requiere capacidad analítica y técnica para resolver problemas. En este capítulo ampliaremos las destrezas para resolver problemas que el lector comenzó a desarrollar en el capítulo anterior.

Comenzaremos con problemas de equilibrio, donde un cuerpo está en reposo o tiene velocidad constante. Luego generalizaremos nuestras técnicas de resolución de problemas a cuerpos que no están en equilibrio, para lo que necesitaremos examinar con precisión las relaciones entre fuerzas y movimiento. Aprenderemos a describir y analizar la fuerza de contacto que actúa sobre un cuerpo que descansa o se desliza en una superficie. Por último, estudiaremos el importante caso del movimiento circular uniforme, en el que un cuerpo se mueve en un círculo con rapidez constante.

En todas estas situaciones interviene el concepto de fuerza, que usaremos en todo nuestro estudio de la física. Cerraremos el capítulo con una mirada a la naturaleza fundamental de la fuerza y las clases de fuerzas que existen en nuestro universo físico.

5.1 | Empleo de la primera ley de Newton: partículas en equilibrio

?

En el capítulo 4 aprendimos que un cuerpo está en *equilibrio* si está en reposo o se mueve con velocidad constante en un marco de referencia inercial. Una lámpara colgante, un puente de suspensión y un avión que vuela en línea recta a altitud y rapidez constante son ejemplos de situaciones de equilibrio. Aquí sólo consideraremos el equilibrio de un cuerpo que puede modelarse como partícula. (En el capítulo 11 veremos los principios que necesitaremos aplicar cuando esto no sea posible.) El principio físico fundamental es la primera ley de Newton: si una partícula está en reposo o se mueve con velocidad constante en un marco de referencia inercial, la fuerza neta que actúa sobre ella —es decir, la suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre ella— debe ser cero:

$$\sum \vec{F} = \mathbf{0} \qquad \text{(partícula en equilibrio, forma vectorial)} \qquad (5.1)$$

Normalmente usaremos esta ecuación en forma de componentes:

$$\sum F_x = 0 \qquad \sum F_y = 0 \qquad (5.2)$$

(partícula en equilibrio, forma de componentes).

Esta sección trata el uso de la primera ley de Newton para resolver problemas de cuerpos en equilibrio. Algunos de los problemas parecerán complicados, pero lo importante es recordar que *todos* estos problemas se resuelven igual. La estrategia siguiente detalla los pasos a seguir. (Al igual que todas las Estrategias para resolver problemas, ésta sigue el formato IPEE —Identificar, Plantear, Ejecutar y Evaluar— que presentamos en la sección 1.2.) Estudie detenidamente la estrategia, vea cómo se aplica en los ejemplos y trate de aplicarla al resolver problemas de tarea.

Estrategia para resolver problemas

Primera ley de Newton: equilibrio de una partícula

IDENTIFICAR *los conceptos pertinentes:* Es preciso usar la primera ley de Newton con cualquier problema que implique fuerzas que actúan sobre un cuerpo en equilibrio. Recuerde que "equilibrio" significa en reposo o en movimiento con velocidad constante. Por ejemplo, un automóvil está en equilibrio cuando está estacionado, pero también cuando viaja por una carretera recta con rapidez constante.

Si en el problema intervienen dos o más cuerpos, y los cuerpos interactúan, también será preciso usar la *tercera* ley de Newton, la cual nos permite relacionar la fuerza que un cuerpo ejerce sobre otro con la que el segundo cuerpo ejerce sobre el primero.

Asegúrese de identificar la(s) incógnita(s). En los problemas de equilibrio, las incógnitas suelen ser la magnitud de una de las fuerzas, las componentes de una fuerza o la dirección de una fuerza.

PLANTEAR *el problema con los pasos siguientes:*

1. Haga un dibujo sencillo de la situación física, con dimensiones y ángulos. ¡No tiene que ser una obra de arte!
2. Para cada cuerpo en equilibrio, dibuje un diagrama de cuerpo libre. Por ahora, consideraremos el cuerpo como partícula, así que represéntelo con un punto grueso. *No* incluya en el diagrama los otros cuerpos que interactúan con él, como la superficie en que descansa o una cuerda que tira de él.
3. Pregúntese ahora qué interactúa con el cuerpo tocándolo o de alguna otra forma. En el diagrama de cuerpo libre, dibuje un vector de fuerza para cada interacción. Si conoce su ángulo, dibújelo con exactitud y rotúlelo. Una superficie en contacto con el cuerpo ejerce una fuerza normal perpendicular a la superficie y tal vez una fuerza de fricción paralela a la superficie. Recuerde que una cuerda o cadena no puede empujar un cuerpo, sólo tirar de él en la dirección de su longitud. Incluya el peso del cuerpo, excepto si su masa (y por ende su peso) es insignificante. Si se da la masa, use $w = mg$ para obtener el peso. Rotule cada fuerza con un símbolo que represente su *magnitud* de la fuerza.

4. *No* muestre en el diagrama de cuerpo libre las fuerzas que el cuerpo ejerce sobre otro. Las sumas de las ecuaciones (5.1) y (5.2) sólo incluyen fuerzas que actúan *sobre* el cuerpo. Asegúrese de poder contestar la pregunta "¿Qué otro cuerpo causa esa fuerza?" para cada fuerza. Si no puede, tal vez esté imaginando una fuerza inexistente.
5. Escoja sus ejes de coordenadas e inclúyalas en su diagrama de cuerpo libre. (Si hay más de un cuerpo en el problema, es preciso escoger ejes por separado para cada cuerpo.) No olvide rotular la dirección positiva de cada eje. Esto será crucial para obtener componentes de los vectores de fuerza como parte de la resolución. Tal vez pueda simplificar el problema escogiendo ejes adecuados. Por ejemplo, si un cuerpo descansa o se desliza sobre una superficie plana, suele ser más sencillo tomar ejes en las direcciones paralela y perpendicular a ella, aun si está inclinada.

EJECUTAR *la solución como sigue:*

1. Obtenga las componentes de cada fuerza a lo largo de cada uno de los ejes de coordenadas del cuerpo. Marque con una línea ondulada cada vector que haya sido sustituido por sus componentes, para no contarlo dos veces. Tenga presente que, aunque la *magnitud* de una fuerza siempre es positiva, la *componente* de una fuerza en una dirección dada puede ser positiva o negativa.
2. Iguale a cero la suma algebraica de las componentes x de fuerza. En otra ecuación, haga lo mismo con las componentes y. (*Nunca* sume componentes x y y en una sola ecuación.) Con estas ecuaciones podrá despejar hasta dos incógnitas: magnitudes de fuerza, componentes o ángulos.
3. Si hay dos o más cuerpos, repita los pasos anteriores para cada uno. Si los cuerpos interactúan, use la tercera ley de Newton para relacionar las fuerzas que ejercen entre sí.
4. Asegúrese de tener tantas ecuaciones independientes como cantidades desconocidas haya. Resuelva las ecuaciones para obtener las incógnitas. Esta parte es álgebra, no física, pero es un paso indispensable.

EVALUAR *la respuesta:* Vea si sus resultados son lógicos. Si el resultado es una expresión simbólica o fórmula, trate de encontrar casos especiales (valores específicos o casos extremos) para los que pueda estimar los resultados. Compruebe que su fórmula funciona en tales casos.

Ejemplo 5.1 Equilibrio unidimensional: tensión en una cuerda sin masa

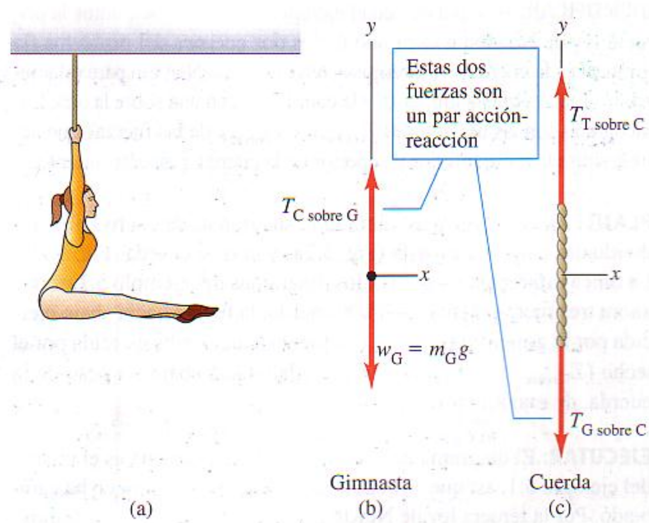
Una gimnasta de masa $m_G = 50.0$ kg se cuelga del extremo inferior de una cuerda colgante. El extremo superior está fijo al techo de un gimnasio (Fig. 5.1a). ¿Cuánto pesa la gimnasta? ¿Qué fuerza (magnitud y dirección) ejerce la cuerda sobre ella? ¿Qué tensión hay en la parte superior de la cuerda? Suponga que la masa de la cuerda es despreciable.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La gimnasta y la cuerda están en equilibrio, así que podemos aplicar la primera ley de Newton a ambos cuerpos. La gimnasta y la cuerda ejercen fuerzas una sobre la otra —es decir, interactúan— así que también usaremos la tercera ley de Newton para relacionar esas fuerzas. Las incógnitas son el peso de la gimnasta, w_G, la fuerza que la cuerda ejerce sobre la gimnasta (llamémosla $T_{C \text{ sobre } G}$) y la tensión que el techo ejerce sobre la parte superior de la cuerda (llamémosla $T_{T \text{ sobre } C}$).

PLANTEAR: Dibujaremos diagramas de cuerpo libre individuales para la gimnasta (Fig. 5.1b) y la cuerda (Fig. 5.1c). Tomaremos el eje $+y$ hacia arriba, como se muestra. Todas las fuerzas actúan verticalmente, así que sólo tienen componente y.

Las dos fuerzas $T_{C \text{ sobre } G}$ y $T_{G \text{ sobre } C}$ son la fuerza hacia arriba de la cuerda sobre la gimnasta (en la Fig. 5.1b) y la fuerza hacia abajo de la gimnasta sobre la cuerda (en la Fig. 5.1c). Estas fuerzas forman un par acción-reacción, así que deben tener la misma magnitud.



5.1 (a) Una gimnasta cuelga en reposo del extremo de una cuerda vertical. (b) Diagrama de cuerpo libre de la gimnasta. (c) Diagrama de cuerpo libre de la cuerda, suponiendo que su peso es despreciable. La fuerza hacia arriba que la cuerda ejerce sobre la gimnasta y la fuerza hacia abajo que la gimnasta ejerce sobre la cuerda son un par acción-reacción.

Vemos también que el peso de la gimnasta w_G es la fuerza de atracción (hacia abajo) que la Tierra ejerce sobre la gimnasta. Su fuerza de reacción es la fuerza de atracción igual y opuesta (hacia arriba) que la *gimnasta* ejerce sobre la *Tierra*. Esta fuerza actúa sobre la Tierra, no sobre la gimnasta, por lo que no aparece en su diagrama de cuerpo libre. Compare esto con el caso de la manzana en el ejemplo conceptual 4.9 (sección 4.5).

EJECUTAR: La magnitud del peso de cualquier objeto es el producto de la masa de ese objeto y la aceleración debida a la gravedad, g. En el caso de la gimnasta, el peso es

$$w_G = m_G g = (50.0\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2) = 490\text{ N}$$

Esta fuerza apunta en la dirección $-y$, así que su componente y es -490 N. La fuerza hacia arriba que la cuerda ejerce sobre la gimnasta tiene magnitud desconocida $T_{C\text{ sobre }G}$. Por la ecuación (5.2), dado que la gimnasta está en equilibrio, la suma algebraica de las componentes y de fuerza que actúan sobre ella debe ser cero:

$$\text{Gimnasta: } \sum F_y = T_{C\text{ sobre }G} + (-w_G) = 0, \quad \text{así que}$$
$$T_{C\text{ sobre }G} = w_G = 490\text{ N}$$

La cuerda tira de la gimnasta *hacia arriba* con una fuerza $T_{C\text{ sobre }G}$ de magnitud 490 N. Por la tercera ley de Newton, la gimnasta tira de la cuerda hacia *abajo* con una fuerza de la misma magnitud, $T_{G\text{ sobre }C} = 490$ N.

La cuerda también está en equilibrio. Hemos supuesto que no tiene peso, así que la fuerza hacia arriba de magnitud $T_{T\text{ sobre }C}$ que el techo ejerce sobre su extremo superior deberá hacer que la fuerza vertical *neta* que actúa sobre la cuerda sea igual a cero. Expresado como ecuación:

$$\text{Cuerda: } \sum F_y = T_{T\text{ sobre }C} + (-T_{G\text{ sobre }C}) = 0 \quad \text{por tanto,}$$
$$T_{T\text{ sobre }C} = T_{G\text{ sobre }C} = 490\text{ N}$$

EVALUAR: La *tensión* en cualquier punto de la cuerda es la fuerza que actúa en ese punto. En el caso de esta cuerda sin peso, la tensión $T_{G\text{ sobre }C}$ en el extremo inferior tiene el mismo valor que la tensión $T_{T\text{ sobre }C}$ en el extremo superior. De hecho, en una cuerda ideal sin peso, la tensión tiene el mismo valor en todos los puntos de la cuerda. (Compare esto con lo dicho en el ejemplo conceptual 4.10 de la sección 4.5.)

Observe que definimos tensión como la *magnitud* de una fuerza, así que siempre es positiva. En cambio, la componente y de la fuerza que actúa sobre la cuerda en su extremo inferior es $-T_{G\text{ sobre }C} = -490$ N.

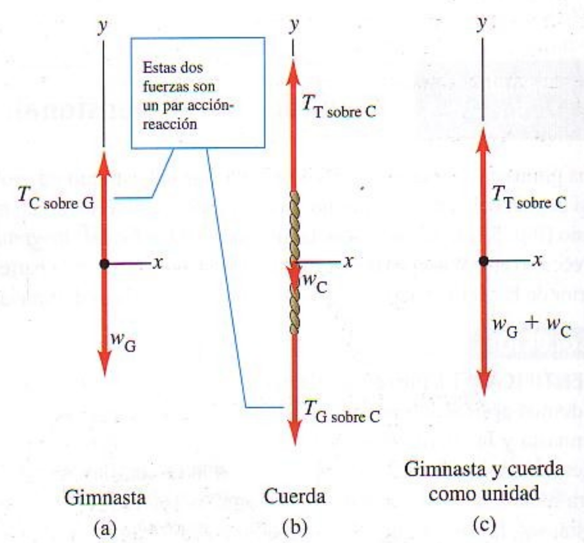
Ejemplo 5.2 Equilibrio unidimensional: tensión en una cuerda con masa

Suponga que en el ejemplo 5.1, el peso de la cuerda no es despreciable, sino de 120 N. Calcule la tensión en cada extremo de la cuerda.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Al igual que en el ejemplo anterior, aplicaremos la primera ley de Newton a cada uno de los dos cuerpos del problema (la gimnasta y la cuerda) y usaremos la tercera ley de Newton para relacionar las fuerzas que la gimnasta y la cuerda ejercen una sobre la otra. Las incógnitas son las magnitudes $T_{G\text{ sobre }C}$ y $T_{T\text{ sobre }C}$ de las fuerzas que actúan sobre la parte inferior y superior de la cuerda, respectivamente.

PLANTEAR: Una vez más, dibujamos diagramas de cuerpo libre individuales para la gimnasta (Fig. 5.2a) y para la cuerda (Fig. 5.2b). La única diferencia respecto a los diagramas del ejemplo 5.1 es que ahora tres fuerzas actúan sobre la cuerda: la fuerza hacia abajo ejercida por la gimnasta ($T_{G\text{ sobre }C}$), la fuerza hacia arriba ejercida por el techo ($T_{T\text{ sobre }C}$) y la fuerza de gravedad hacia abajo (el peso de la cuerda, de magnitud $w_C = 120$ N).



5.2 Diagramas de cuerpo libre para (a) la gimnasta (peso w_G) y (b) la cuerda (peso w_C). (Compare con la Fig. 5.1.) (c) Diagrama de cuerpo libre para la gimnasta y la cuerda, considerados como un solo cuerpo compuesto.

EJECUTAR: El diagrama de cuerpo libre de la gimnasta es el mismo del ejemplo 5.1, así que su condición de equilibrio tampoco ha cambiado. Por la tercera ley de Newton, $T_{C\text{ sobre }G} = T_{G\text{ sobre }C}$, y tenemos

$$\text{Gimnasta: } \sum F_y = T_{C\text{ sobre }G} + (-w_G) = 0 \quad \text{así que}$$
$$T_{C\text{ sobre }G} = T_{G\text{ sobre }C} = w_G = 490\text{ N}$$

La condición de equilibrio $\sum F_y = 0$ para la cuerda es

$$\text{Cuerda: } \sum F_y = T_{T\text{ sobre }C} + (-T_{G\text{ sobre }T}) + (-w_T) = 0$$

Observe que la componente y de $T_{T\text{ sobre }C}$ es positiva porque apunta en la dirección $+y$, pero las componentes y tanto de $T_{G\text{ sobre }C}$ como de w_C son negativas. Después de despejar $T_{T\text{ sobre }C}$ y sustituir los valores $T_{G\text{ sobre }C} = T_{C\text{ sobre }G} = 490$ N y $w_C = 120$ N, tenemos

$$T_{T\text{ sobre }C} = T_{G\text{ sobre }C} + w_C = 490\text{ N} + 120\text{ N} = 610\text{ N}$$

EVALUAR: Cuando incluimos el peso de la cuerda, vemos que la tensión es *diferente* en los dos extremos de la cuerda. Esto es lógico: la fuerza $T_{\text{T sobre C}}$ que el techo ejerce debe sostener tanto el peso de 490 N de la gimnasta como el peso de 120 N de la cuerda, así que $T_{\text{T sobre C}} = 610$ N.

Para ver esto de forma más explícita, dibuje un diagrama de cuerpo libre para un cuerpo compuesto que consiste en la gimnasta y la cuerda considerados como unidad (Fig. 5.2c). Sólo actúan dos fuerzas externas sobre este cuerpo compuesto: la fuerza $T_{\text{T sobre C}}$ ejercida por el techo y el peso total $w_G + w_C = 490\text{ N} + 120\text{ N} = 610\text{ N}$. (Las fuerzas $T_{\text{G sobre C}}$ y $T_{\text{C sobre G}}$ son *internas* en lo que al cuerpo compuesto respecta. Dado que en la primera ley de Newton sólo intervienen fuerzas *externas*, éstas no vienen al caso.) Por tanto, la primera ley de Newton aplicada al cuerpo compuesto es

$$\text{Cuerpo compuesto: } \sum F_y = T_{\text{T sobre C}} + [-(w_G + w_C)] = 0$$

Así que $T_{\text{T sobre C}} = w_G + w_C = 610$ N.

Este método de tratar a la gimnasta y la cuerda como cuerpo compuesto parece mucho más sencillo, y quizá el lector se pregunte por qué no lo usamos al principio. La respuesta es que, con ese método, no podíamos obtener la tensión $T_{\text{G sobre C}}$ en el extremo inferior de la cuerda. La moraleja es: si hay dos o más cuerpos en un problema en el que intervienen las leyes de Newton, lo más seguro es tratar a cada cuerpo individualmente.

Ejemplo 5.3 Equilibrio bidimensional

En la figura 5.3a, un motor de peso w cuelga de una cadena unida en el punto O a otras dos, una sujeta al techo y la otra a la pared. Calcule las tensiones en las tres cadenas, suponiendo que se da w y los pesos de las cadenas y el anillo son despreciables.

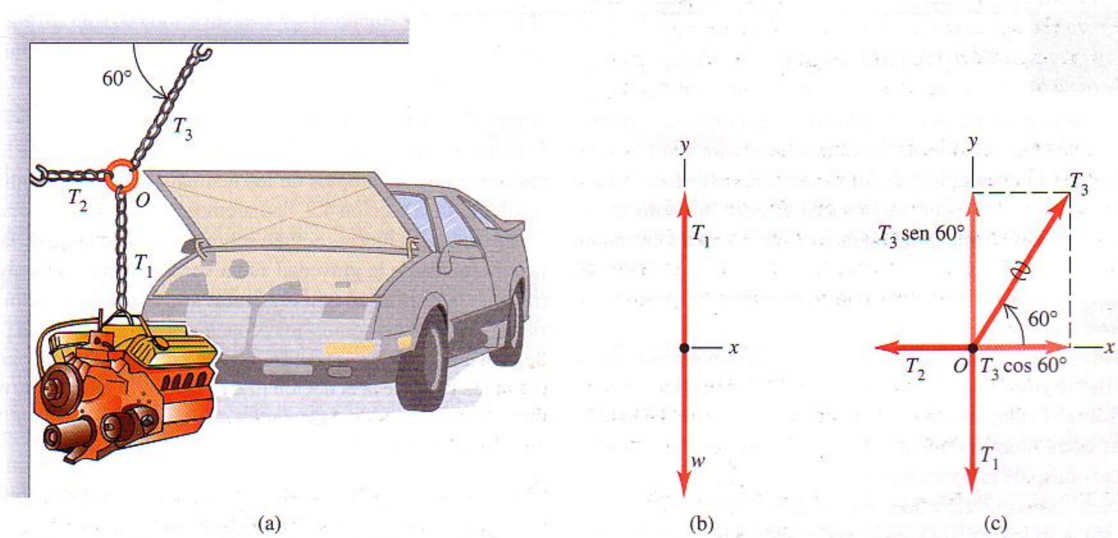
SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Las incógnitas son las tensiones T_1, T_2 y T_3 en las tres cadenas (Fig. 5.3a). Podría parecer extraño despreciar el peso de las cadenas, si en el ejemplo 5.2 *no* despreciamos el de una simple cuerda. La razón es que el peso de las cadenas es muy pequeño en comparación con el del motor. En el ejemplo 5.2 el peso de la cuerda era una fracción apreciable del de la gimnasta (120 N vs. 490 N).

Todos los cuerpos del ejemplo están en equilibrio, así que usaremos la primera ley de Newton para determinar T_1, T_2 y T_3. Necesitamos tres ecuaciones simultáneas, una para cada incógnita. Sin embargo, la aplicación de la primera ley de Newton a un solo cuerpo sólo nos da *dos* ecuaciones, como en la ecuación (5.2). Por tanto, para resolver el problema, será preciso considerar más de un cuerpo en equilibrio. Examinaremos el motor (sobre el que actúa T_1) y el anillo (que está unido a las tres cadenas, así que sobre él actúan las tres tensiones).

PLANTEAR: Las figuras 5.3b y 5.3c son diagramas de cuerpo libre para el motor y el anillo, respectivamente. Al igual que en los ejemplos 5.1 y 5.2, hemos incluido un sistema de coordenadas x-y en cada diagrama.

Las dos fuerzas que actúan sobre el motor son su peso w y la fuerza hacia arriba T_1 ejercida por la cadena vertical; las tres fuerzas que actúan sobre el anillo son las tensiones de la cadena vertical



5.3 (a) Motor de coche con peso w suspendido de una cadena unida en O a otras dos. Se supone que las cadenas no tienen masa. (b) Diagrama de cuerpo libre del motor. (c) Diagrama de cuerpo libre del anillo, después de sustituir $\vec{T}_3$ por sus componentes.

(T_1), la cadena horizontal (T_2) y la cadena inclinada (T_3). Observe que la cadena vertical ejerce fuerzas de la misma magnitud T_1 en ambos extremos: hacia arriba sobre el motor en la figura 5.3b y hacia abajo sobre el anillo en la figura 5.3c. Ello se debe a que el peso de la cadena es despreciable (véase el ejemplo 5.1). Si el peso no fuera despreciable, estas dos fuerzas tendrían diferente magnitud, como fue el caso de la cuerda en el ejemplo 5.2. Recuerde que también estamos despreciando el peso del anillo, así que no lo incluimos en las fuerzas de la figura 5.3c.

EJECUTAR: Las fuerzas que actúan sobre el motor están únicamente sobre el eje y; entonces, por la primera ley de Newton,

$$\text{Motor: } \sum F_y = T_1 + (-w) = 0 \quad \text{y} \quad T_1 = w$$

Observe que las cadenas horizontal e inclinada no ejercen fuerzas sobre el motor, porque no están unidas a él, aunque sí aparecen en la aplicación de la primera ley de Newton al anillo.

En el diagrama de cuerpo libre para el anillo (Fig. 5.3c), recuerde que T_1, T_2 y T_3 son las *magnitudes* de las fuerzas; los vectores del diagrama indican su dirección. Primero descomponemos la fuerza con magnitud T_3 en sus componentes x y y. Así, podremos plantear las condiciones de equilibrio del anillo escribiendo ecuaciones individuales para las componentes x y y. (Recuerde lo dicho en la estrategia para resolver problemas, en el sentido de que *nunca* deben sumarse componentes x y y en una misma ecuación.) Obtenemos

$$\text{Anillo: } \sum F_x = T_3 \cos 60° + (-T_2) = 0$$
$$\text{Anillo: } \sum F_y = T_3 \operatorname{sen} 60° + (-T_1) = 0$$

Puesto que $T_1 = w$ (por la ecuación para el motor), podemos escribir la segunda ecuación del anillo así:

$$T_3 = \frac{T_1}{\operatorname{sen} 60°} = \frac{w}{\operatorname{sen} 60°} = 1.155w$$

Ahora podemos usar este resultado en la primera ecuación del anillo:

$$T_2 = T_3 \cos 60° = w\frac{\cos 60°}{\operatorname{sen} 60°} = 0.577w$$

Así, podemos expresar las tres tensiones como múltiplos del peso w del motor, que supuestamente se conoce. En síntesis,

$$T_1 = w$$
$$T_2 = 0.577w$$
$$T_3 = 1.155w$$

EVALUAR: Nuestros resultados muestran que la cadena sujeta al techo ejerce una fuerza sobre el anillo de magnitud T_3, *mayor* que el peso del motor. Si le parece raro, observe que la componente *vertical* de esta fuerza es igual a T_1, que a su vez es igual a w, pero como además la fuerza tiene una componente horizontal, su magnitud T_3 debe ser algo mayor que w. Por tanto, la cadena sujeta al techo es la que está sometida a mayor tensión y es la más susceptible de romperse.

Es probable que, a primera vista, el lector haya pensado que el cuerpo más importante en este problema era el motor. Sin embargo, para tener suficientes ecuaciones, también fue necesario considerar las fuerzas que actúan sobre un segundo cuerpo (en este caso, el anillo que une las cadenas). Las situaciones de este tipo son muy comunes en problemas de equilibrio, así que tenga presente esta técnica.

Ejemplo 5.4 Plano inclinado

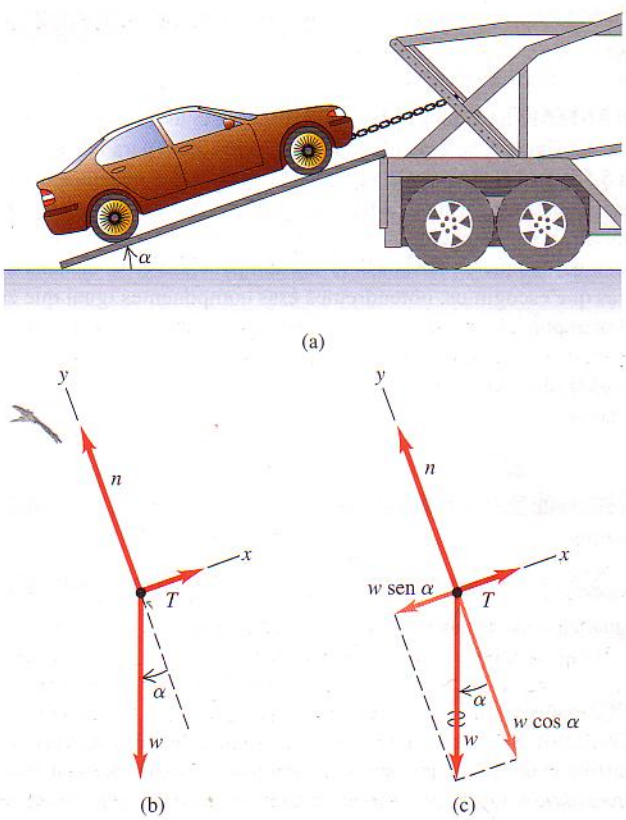
Un auto descansa en los rieles inclinados de una rampa que conduce a un remolque (Fig. 5.4a). Sólo un cable conectado al auto y a la armazón del remolque evita que el auto baje la rampa. (Los frenos y la transmisión del auto están sueltos.) Si el peso del auto es w, calcule la tensión en el cable y la fuerza con que los rieles empujan los neumáticos.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El auto está en equilibrio, así que usaremos otra vez la primera ley de Newton. Una complicación es que la rampa ejerce *cuatro* fuerzas sobre el auto, una en cada neumático. Por sencillez, juntaremos todas estas fuerzas en una sola. Otra simplificación es que haremos caso omiso de la componente de esta fuerza que actúa *paralela* a los rieles. Esto equivale a decir que actúa muy poca fricción sobre el auto. (Si la fricción fuera considerable, los rieles ejercerían una *fuerza de fricción* paralela a la rampa, que tendería a impedir que el auto baje por la rampa. Aquí haremos caso omiso de este efecto, pero volveremos a él en la sección 5.3.) Por tanto, podemos decir que la rampa sólo ejerce sobre el auto una fuerza *perpendicular* a los rieles. Esta fuerza aparece porque los átomos de la superficie de los rieles se resisten a que los átomos de los neumáticos penetren entre ellos. Al igual que en la sección 4.2, llamaremos a esta fuerza "*fuerza normal*".

No todas las fuerzas actúan sobre el auto a lo largo de la misma línea: la fuerza de la gravedad actúa verticalmente hacia abajo, mientras que la normal es perpendicular a la superficie inclinada de los rieles. Por tanto, tenemos dos ecuaciones distintas para la primera ley de Newton, una para las componentes x de fuerza y otra para las componentes y [véase la ecuación (5.2)]. Éste es el número de ecuaciones que necesitamos para despejar las dos incógnitas, la magnitud T de la tensión en el cable y la magnitud n de la fuerza normal.

PLANTEAR: La figura 5.4b muestra un diagrama de cuerpo libre para el auto. Las tres fuerzas que actúan sobre el auto son su peso (magnitud w), la tensión del cable (magnitud T) y la fuerza normal (magnitud n). Esta última actúa hacia arriba y hacia la izquierda porque está impidiendo que el auto penetre en los rieles sólidos.



5.4 (a) Un cable sostiene al auto en la rampa. (b) Diagrama de cuerpo libre del auto. (c) Diagrama de cuerpo libre en el que el peso del auto se ha sustituido por sus componentes (w sen α rampa abajo, w cos α perpendicular a la rampa).

Tomamos los ejes de coordenadas x y y paralelos y perpendiculares a la rampa, como se muestra. Esto facilita el análisis del problema porque así sólo la fuerza del peso tiene componentes tanto x como y. Si escogiéramos ejes horizontal y vertical, nuestra tarea sería más difícil porque tendríamos que descomponer *dos* fuerzas (la normal y la tensión).

El ángulo α entre la rampa y la horizontal es igual al ángulo α entre el vector de peso $\vec{w}$ y la normal al plano de la rampa.

EJECUTAR: Para escribir las componentes x y y de la primera ley de Newton, necesitamos obtener las componentes del peso. Una complicación es que el ángulo α en la figura 5.4b *no* se mide del eje $+x$ al $+y$, así que *no* podemos usar las ecuaciones (1.7) directamente para obtener las componentes. (Quizá desee repasar la sección 1.8, pues este punto es importante.)

Una estrategia para obtener las componentes de $\vec{w}$ es considerar los triángulos rectángulos de la figura 5.4c. El seno de α es la magnitud de la componente x de $\vec{w}$ (que es, el cateto opuesto a α del triángulo) dividida entre la magnitud w (la hipotenusa). Asimismo, el coseno de α es la magnitud de la componente y (el cateto adyacente a α del triángulo) dividida entre w. Ambas componentes son negativas, así que $w_x = -w \text{ sen } \alpha$ y $w_y = -w \cos \alpha$.

Otra estrategia sería reconocer que en una componente de $\vec{w}$ debe intervenir el sen α, y el cos α en la otra. Para decidir cuál es cuál, resulta útil dibujar el diagrama de cuerpo libre de modo que el ángulo α sea apreciablemente mayor o menor que 45°. (Tal cosa es válida porque no se especificó el valor de α. Le recomendamos no ceder a la tendencia natural de dibujar tales ángulos como cercanos a 45°.) Aquí dibujamos las figuras 5.4b y 5.4c de modo que α sea menor que 45°, lo que implica que sen α es menor que cos α. La figura 5.4c muestra que la componente x de $\vec{w}$ es menor que la componente y, así que en la primera deberá intervenir sen α, y en la segunda, cos α. Dado que ambas componentes son negativas, obtenemos otra vez que $w_x = -w \text{ sen } \alpha$ y $w_y = -w \cos \alpha$.

Tachamos con una línea ondulada el vector original que representa el peso para recordar que no debemos contarlo dos veces. Las condiciones de equilibrio nos dan

$$\sum F_x = T + (-w \text{ sen } \alpha) = 0$$
$$\sum F_y = n + (-w \cos \alpha) = 0$$

Asegúrese de entender la relación entre estos signos y las coordenadas escogidas. Recuerde que, por definición, T, w y n son *magnitudes* de vectores y por tanto positivas.

Despejando T y n, obtenemos

$$T = w \text{ sen } \alpha$$
$$n = w \cos \alpha$$

EVALUAR: Los valores obtenidos para T y n dependen del valor de α. A fin de verificar qué tan razonables son estar respuestas, vamos a examinar ciertos casos especiales. Si el ángulo α es cero, entonces sen $\alpha = 0$ y cos $\alpha = 1$. En este caso, los rieles son horizontales; nuestra respuesta nos dice que no se necesita la tensión T del cable para sostener al auto y la fuerza normal total n es igual en magnitud al peso. Si $\alpha = 90°$, sen $\alpha = 1$ y cos $\alpha = 0$. Aquí la tensión T es igual al peso w y la fuerza normal n es cero. ¿Son éstos los resultados esperados en estos casos especiales?

CUIDADO Es un error común suponer automáticamente que la magnitud n de la fuerza normal es igual al peso w. Nuestro resultado demuestra que, en general, eso *no* es cierto. Siempre es mejor tratar n como una variable y calcular su valor, como hicimos aquí.

Por último, pregúntese cómo cambiarían T y n si el auto no estuviera estacionario y el cable estuviera tirando de él para subirlo por la rampa con rapidez constante. Deberá reconocer de inmediato que ésta es otra situación de equilibrio, pues la velocidad del auto es constante. Por tanto, el cálculo es idéntico, y T y n tienen los mismos valores que cuando el auto está en reposo. (Es verdad que T debe ser mayor que w sen α para *iniciar* el movimiento del auto, pero eso no es lo que preguntamos.)

Ejemplo 5.5 Tensión en una polea sin fricción

Se están sacando bloques de granito de una cantera por una pendiente de 15°. Por razones ecológicas, también se está echando tierra en la cantera para llenar agujeros. Imagine que le han pedido hallar una forma de usar esa tierra para facilitar la extracción del granito. Ud. diseña un sistema en el que una cubeta con tierra (de peso w_2 incluida la cubeta) tira de un bloque de granito en un carro (peso w_1 incluido el carro) sobre rieles de acero inclinados 15°, al caer verticalmente a la cantera (Fig. 5.5a). Haciendo caso omiso de la fricción en la polea y en las ruedas del carro, y el peso del cable, determine qué relación debe haber entre w_1 y w_2 para que el sistema funcione con rapidez constante.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El carro y la cubeta se mueven con velocidad constante (es decir, en línea recta con rapidez constante). Por tanto, los dos cuerpos están en equilibrio y podemos aplicar la primera ley de Newton a cada uno.

Las dos incógnitas son los pesos w_1 y w_2. Las fuerzas que actúan sobre la cubeta son su peso w_2 y una tensión hacia arriba ejercida por el cable; ambas fuerzas son exclusivamente verticales. Por tanto, la primera ley de Newton aplicada a la cubeta nos da una sola ecuación. Sobre el carro actúan *tres* fuerzas: su peso w_1, una fuerza normal de magnitud n ejercida por los rieles y una fuerza de tensión del cable. (Estamos haciendo caso omiso de la fricción, así que suponemos que los rieles no ejercen ninguna fuerza paralela a la pendiente.) Esta situación es idéntica a la del automóvil en la rampa del ejemplo 5.4. Igual que en ese ejemplo, las fuerzas que actúan sobre el carro no tienen todas la misma dirección, así que necesitaremos usar ambas componentes de la primera ley de Newton, ecuación (5.2).

Estamos suponiendo que el cable no tiene peso, así que las fuerzas de tensión que la cuerda ejerce sobre el carro y la cubeta tienen la misma magnitud T.

PLANTEAR: La figura 5.5b es nuestro modelo idealizado del sistema. La figura 5.5c es el diagrama de cuerpo libre para la cubeta, y la 5.5d, para el bloque y el carro. Cabe señalar que podemos orientar los ejes de forma distinta para cada cuerpo. Los ejes que se muestran son la opción que más nos conviene. Representamos el peso del bloque en términos de sus componentes en el sistema de ejes que escogimos; obtendremos esas componentes igual que en el ejemplo 5.4.

EJECUTAR: Aplicando $\sum F_y = 0$ a la cubeta en la figura 5.5c, tenemos

$$\sum F_y = T + (-w_2) = 0 \quad \text{así que} \quad T = w_2$$

Aplicando $\sum F_x = 0$ al bloque + carrito en la figura 5.5d, obtenemos

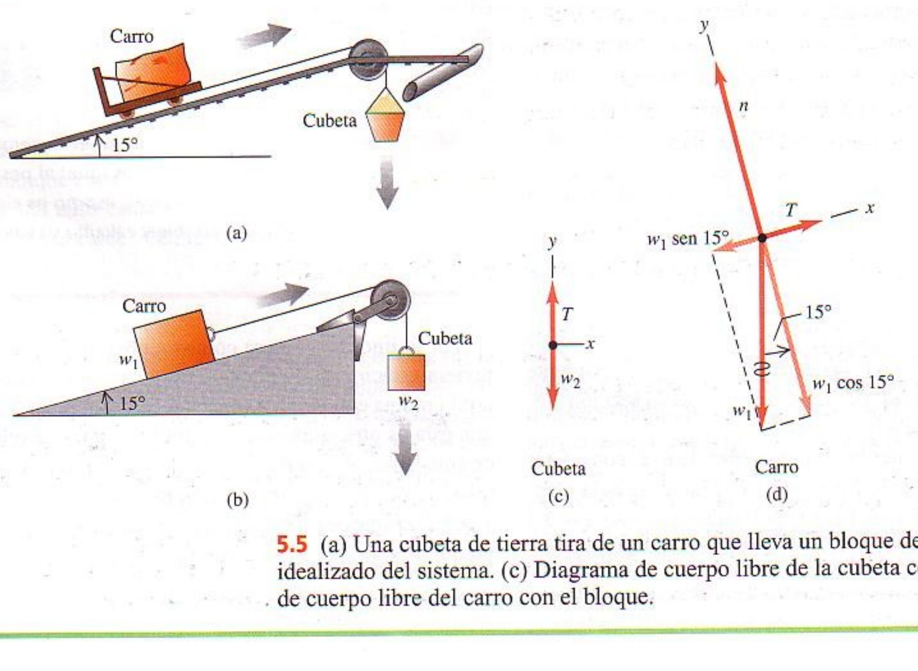
$$\sum F_x = T + (-w_1 \text{ sen } 15°) = 0 \quad \text{así que} \quad T = w_1 \text{ sen } 15°$$

Igualando las dos expresiones para T, tenemos

$$w_2 = w_1 \text{ sen } 15° = 0.26 w_1$$

EVALUAR: Si el peso de la cubeta con tierra es el 26% del peso del carro y el bloque, el sistema se podrá mover con rapidez constante en *cualquier* dirección (nuestro análisis no depende de la dirección del movimiento, sólo de que la velocidad sea constante). ¿Entiende qué pasaría si w_2 fuera mayor que $0.26w_1$? ¿Y si fuera menor que $0.26w_1$?

Observe que no fue necesario aplicar la ecuación $\sum F_y = 0$ al carro y al bloque; sólo lo sería si quisiéramos calcular n. ¿Puede demostrar que $n = w_1 \cos 15°$?



5.5 (a) Una cubeta de tierra tira de un carro que lleva un bloque de granito. (b) Modelo idealizado del sistema. (c) Diagrama de cuerpo libre de la cubeta con tierra. d) Diagrama de cuerpo libre del carro con el bloque.

Evalúe su comprensión

Un semáforo con masa m pende de dos cables ligeros, uno a cada lado. Los dos cables cuelgan con un ángulo de 45° respecto a la horizontal. ¿Qué tensión hay en cada cable?

5.2 | Empleo de la segunda ley de Newton: dinámica de partículas

Ahora podemos analizar problemas de *dinámica*, donde aplicamos la segunda ley de Newton a cuerpos con aceleración (*no* en equilibrio). En este caso, la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo no es cero, y es igual a la masa del cuerpo multiplicada por su aceleración:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \qquad \text{(segunda ley de Newton, forma vectorial)} \qquad (5.3)$$

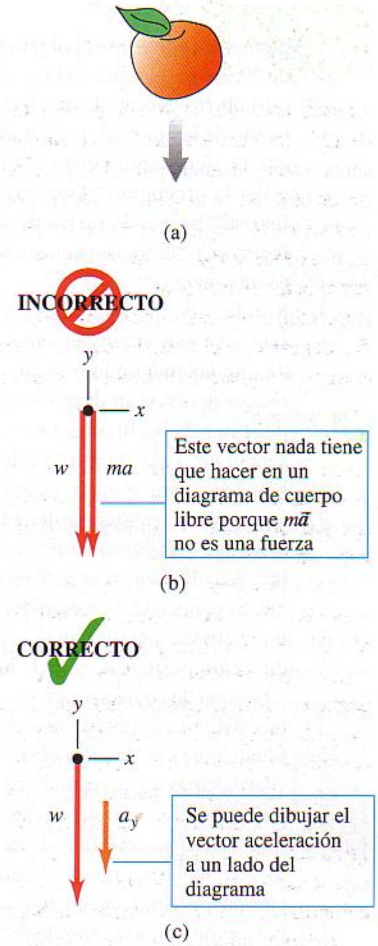
Normalmente usaremos esta relación en su forma de componentes:

$$\sum F_x = ma_x \qquad \sum F_y = ma_y \qquad (5.4)$$

(segunda ley de Newton, forma de componentes)

La estrategia que presentaremos en seguida es muy similar a la que seguimos para resolver problemas de equilibrio en la sección 5.1. Estúdiela con detenimiento, vea cómo se aplica en los ejemplos y úsela para resolver los problemas al final del capítulo. Recuerde que *todos* los problemas de dinámica pueden resolverse con esta estrategia.

CUIDADO Insistimos en que la cantidad $m\vec{a}$ *no* es una fuerza; no es un empujón ni tirón ejercido por algo del entorno. Las ecuaciones (5.3) y (5.4) sólo dicen que la aceleración $\vec{a}$ es proporcional a la fuerza neta $\sum\vec{F}$. Al dibujar el diagrama de cuerpo libre de un cuerpo en aceleración (como la fruta de la figura 5.6a), *nunca* incluya "la fuerza $m\vec{a}$ porque *no* existe (Fig. 5.6b). Repase la sección 4.3 si todavía no le ha quedado claro esto. A veces dibujaremos el vector aceleración $\vec{a}$ *junto* a un diagrama de cuerpo libre, como en la figura. 5.6c, pero *nunca* lo mostraremos con su cola tocando el cuerpo (posición reservada exclusivamente para las fuerzas que actúan sobre el cuerpo).



5.6 (a) La única fuerza que actúa sobre esta fruta al caer es la atracción gravitacional de la Tierra. (b) Diagrama de cuerpo libre incorrecto. (c) Diagrama de cuerpo libre correcto.

Estrategia para resolver problemas

Segunda ley de Newton: dinámica de partículas

IDENTIFICAR *los conceptos pertinentes:* Es preciso usar la segunda ley de Newton al resolver *cualquier* problema en el que intervengan fuerzas que actúan sobre un cuerpo con aceleración.

Al igual que en todos los problemas, identifique la incógnita, que suele ser una aceleración o una fuerza. Si es otra cosa, habrá que identificar y usar otro concepto. Por ejemplo, suponga que le piden determinar con qué rapidez se está moviendo un trineo cuando llega al pie de una loma. Ello implica que la incógnita es la velocidad final del trineo. Para obtenerla, primero necesitará usar la segunda ley de Newton para calcular la aceleración del trineo. Después, tendrá que usar las relaciones para aceleración constante de la sección 2.4 y obtener la velocidad a partir de la aceleración.

PLANTEAR *el problema siguiendo estos pasos:*

1. Haga un dibujo sencillo de la situación. Identifique uno o más cuerpos en movimiento a los que aplicará la segunda ley de Newton.
2. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para cada cuerpo identificado, que muestre todas las fuerzas que actúan *sobre* el cuerpo. (No haga un dibujo muy elegante; sim-

plemente represente el objeto con un punto.) Tenga cuidado de *no* incluir fuerzas que el objeto ejerza sobre algún otro objeto. Recuerde que la aceleración de un cuerpo depende de las fuerzas que actúan sobre él, no de las fuerzas que él ejerce sobre otras cosas. Asegúrese de poder contestar la pregunta: "¿Qué otro cuerpo está aplicando esta fuerza?" para cada fuerza de su diagrama. Además, nunca incluya la cantidad $m\vec{a}$ en su diagrama de cuerpo libre; ¡no es una fuerza!

3. Rotule cada fuerza con un símbolo algebraico para representar su *magnitud* y el valor numérico si se da. (Recuerde que las magnitudes siempre son positivas. Los signos menos aparecerán después cuando se obtengan las componentes de las fuerzas.) Por lo regular, una de las fuerzas será el peso del cuerpo; rotúlelo $w = mg$. Si se da el valor numérico para la masa, se podrá calcular el peso.
4. Escoja los ejes de coordenadas x y y para cada objeto y muéstrelos explícitamente en cada diagrama de cuerpo libre. No olvide indicar cuál es la dirección positiva de cada eje. Si conoce la dirección de la aceleración, las cosas normalmente se simplifican si se escoge esa dirección como la dirección positiva de uno de los ejes. Si en el problema intervienen dos o más objetos y éstos se aceleran en direcciones distintas, se pueden usar distintos ejes para cada objeto.
5. Identifique cualesquier otras ecuaciones que podría necesitar además de la segunda ley de Newton, $\sum\vec{F} = m\vec{a}$ (Se requiere una ecuación por cada incógnita). Por ejemplo, podría necesitar una o más de las ecuaciones para movimiento con aceleración constante. Si intervienen dos o más cuerpos, podrían existir relaciones entre sus movimientos; por ejemplo, los cuerpos podrían estar unidos con una cuerda. Exprese todas esas relaciones en forma de ecuaciones que relacionan las aceleraciones de los distintos cuerpos.

EJECUTAR *la solución como sigue:*

1. Para cada objeto, determine las componentes de las fuerzas a lo largo de cada eje de coordenadas del objeto. Cuando represente una fuerza en términos de sus componentes, tache con una línea ondulada el vector original para recordar no incluirlo dos veces.
2. Para cada objeto, escriba una ecuación aparte para cada componente de la segunda ley de Newton, como en la ecuación (5.4).
3. Haga una lista de todas las cantidades conocidas y desconocidas, identificando las incógnitas.
4. Compruebe que tenga tantas ecuaciones como incógnitas hay. Si le faltan ecuaciones, retroceda al paso 5 de "Plantear el problema". Si le sobran ecuaciones, podría haber una cantidad desconocida que no se ha identificado como tal.
5. Haga la parte fácil: ¡los cálculos! Resuelva las ecuaciones para obtener las incógnitas.

EVALUAR *la respuesta:* ¿Su respuesta tiene las unidades correctas? (En su caso, utilice la conversión $1\ \text{N} = 1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2$.) ¿Tiene el signo algebraico apropiado? (Si el problema se refiere a un trineo que se desliza por una loma, probablemente escogió el eje x positivo de modo que apuntara pendiente abajo. Si después obtiene una aceleración negativa —es decir, pendiente arriba— sabrá que hay algún error en los cálculos.) Si es posible, considere valores específicos o casos extremos de las cantidades, y compare los resultados con lo que esperaba intuitivamente. Pregúntese "¿es lógico el resultado?"

Ejemplo 5.6 Movimiento rectilíneo con una fuerza constante

Un velero para hielo descansa en una superficie horizontal sin fricción (Fig. 5.7a). Sopla un viento constante (en la dirección de los patines del trineo) de modo que, 4.0 s después de soltarse el velero, adquiere una velocidad de 6.0 m/s (unos 22 km/h). ¿Qué fuerza constante F_V ejerce el viento sobre el velero? La masa total (velero + tripulante) es de 200 kg.

SOLUCIÓN

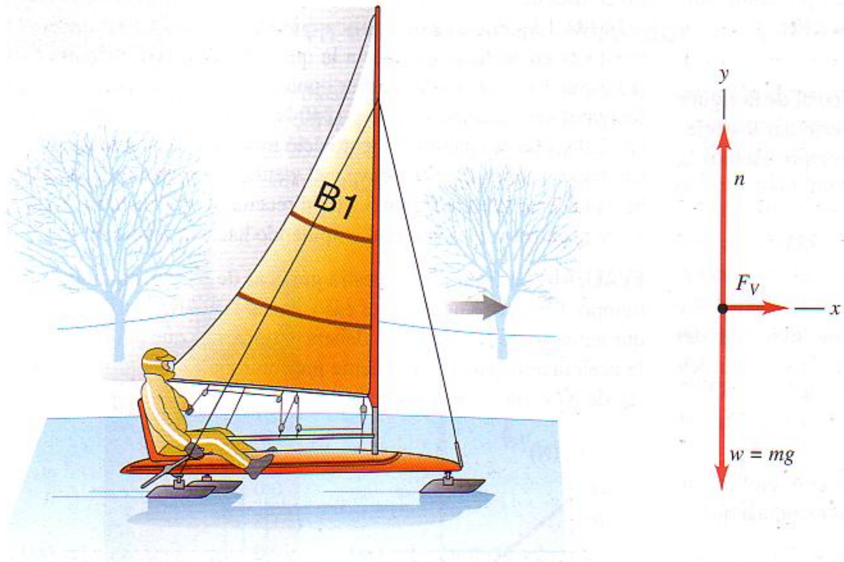
IDENTIFICAR: Nuestra incógnita es una de las fuerzas (F_V) que actúan sobre el velero, así que necesitaremos usar la segunda ley de Newton. Esa ley implica fuerzas y aceleración, pero no nos dan la aceleración, así que habrá que calcularla. Se supone que el viento es constante, así que las fuerzas no cambian con el tiempo y la aceleración producida es constante. Esto implica que podremos usar una de las fórmulas de aceleración constante.

PLANTEAR: La figura 5.7b muestra el diagrama de cuerpo libre para el velero y el tripulante considerados como una unidad. Las fuerzas que actúan sobre este objeto son el peso w, la fuerza normal n ejercida por la superficie y la fuerza horizontal F_V (nuestra incógnita). La fuerza neta y por tanto la aceleración están dirigidas a la derecha, así que escogemos el eje $+x$ en esa dirección.

Puesto que no se da la aceleración, tendremos que obtenerla a partir de otros datos del problema: la velocidad final $v_x = 6.0$ m/s y el tiempo transcurrido $t = 4.0$ s. El velero parte del reposo, así que la velocidad inicial es $v_{0x} = 0$. En la sección 2.4 vimos que una ecuación que relaciona la aceleración a_x con esas cantidades es la ecuación (2.8), $v_x = v_{0x} + a_x t$.

EJECUTAR: La fuerza F_V tiene la dirección $+x$, mientras que las fuerzas n y mg tienen las direcciones $+y$ y $-y$, respectivamente. Por tanto, las ecuaciones x y y para la segunda ley de Newton son

$$\sum F_x = F_V = ma_x$$
$$\sum F_y = n + (-mg) = 0$$



(a) (b)

5.7 (a) Velero para hielo que parte del reposo. (b) Diagrama de cuerpo libre del velero y su tripulante si no hay fricción.

(Observe que la aceleración en la dirección y es cero; el velero no se acelera hacia arriba ni hacia abajo.) Además, tenemos la ecuación de aceleración constante

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

Las cantidades *conocidas* son la masa $m = 200$ kg, la velocidad final $v_x = 6.0$ m/s, la velocidad inicial $v_{0x} = 0$ y el tiempo transcurrido $t = 4.0$ s. Las *incógnitas* son la aceleración a_x, la fuerza normal n y la fuerza horizontal F_V (la incógnita). Hay tantas incógnitas (tres) como ecuaciones, así que todo va bien.

Para obtener F_V, primero obtenemos a_x de la ecuación para aceleración constante y la sustituimos en la ecuación de $\sum F_x$:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = \frac{6.0\text{ m/s} - 0\text{ m/s}}{4.0\text{ s}} = 1.5\text{ m/s}^2$$

$$F_V = ma_x = (200\text{ kg})(1.5\text{ m/s}^2) = 300\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$$

Un kg · m/s² equivale a un newton (N), así que la respuesta final es

$$F_V = 300\text{ N (unas 67 lb)}$$

Observe que no necesitamos la ecuación $\sum F_y$ para obtener F_V. La necesitaríamos si quisiéramos obtener la fuerza normal n:

$$n - mg = 0$$

$$n - mg = (200\text{ kg})(9.8\text{ m/s}^2)$$

$$= 2.0 \times 10^3\text{ N} \qquad \text{(unas 440 lb)}$$

La magnitud n de la fuerza normal es igual al peso combinado del velero y el tripulante porque la superficie es horizontal y no actúan otras fuerzas verticales.

EVALUAR: Los valores que obtuvimos para F_V y n tienen unidades de fuerza, como debe ser. ¿Le parece razonable que la fuerza F_V sea mucho menor que el peso combinado del velero y el tripulante?

Ejemplo 5.7 Movimiento rectilíneo con una fuerza que varía con el tiempo

Consideremos otra vez el velero que se mueve sobre hielo sin fricción (ejemplo 5.6), pero ahora supongamos que, una vez que el velero comienza a moverse, su posición en función del tiempo es

$$x = (1.2\text{ m/s}^2)t^2 - (0.20\text{ m/s}^3)t^3$$

Obtenga la fuerza F_V ejercida por el viento en función del tiempo en este caso. Determine esa fuerza en el instante $t = 3.0$ s. ¿En qué instantes la fuerza es cero? ¿Positiva? ¿Negativa?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Igual que en el ejemplo 5.6, F_V es nuestra incógnita, así que tendremos que usar otra vez la segunda ley de Newton. No nos dan la aceleración, pero conocemos la posición x en función del tiempo t; por tanto, podremos determinar la aceleración obteniendo la segunda derivada de x respecto a t, como en la sección 2.3.

Observe que la expresión para x incluye un término en t^3, que no aparece en ninguna de las fórmulas para aceleración constante.

Esto nos dice que la aceleración a_x no es constante, y por tanto tampoco lo es la fuerza F_V. La fuerza varía en esta situación.

PLANTEAR: El diagrama de cuerpo libre es idéntico al de la figura 5.7, pues es válido sea F_V constante o no. Para determinar la aceleración a_x a partir de la posición x en función del tiempo, usamos la ecuación (2.6):

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

EJECUTAR: Dado que el diagrama de cuerpo libre es el mismo del ejemplo 5.6, la ecuación para la componente x de la segunda ley de Newton también es la misma:

$$\sum F_x = F_V = ma_x$$

Lo único que nos falta para determinar F_V es obtener a_x en función del tiempo. La segunda derivada de t^2 es 2, y la de t^3, $6t$, así que

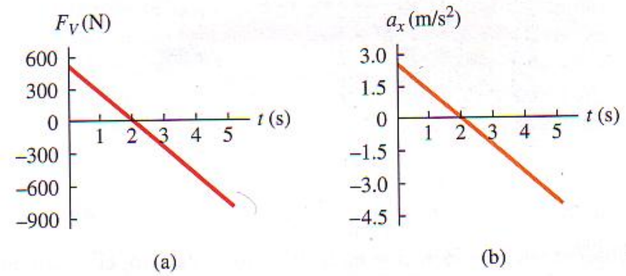
$$\begin{aligned} a_x &= \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}[(1.2\ \text{m/s}^2)t^2 - (0.20\ \text{m/s}^3)t^3] \\ &= 2.4\ \text{m/s}^2 - (1.2\ \text{m/s}^3)t \end{aligned}$$

Entonces, la fuerza del viento en función del tiempo es

$$\begin{aligned} F_V &= ma_x = (200\ \text{kg})[2.4\ \text{m/s}^2 - (1.2\ \text{m/s}^3)t] \\ &= 480\ \text{N} - (240\ \text{N/s})t \end{aligned}$$

En el instante $t = 3.0$ s, el valor de F_V es 480 N − (240 N/s)(3.0 s) = −240 N. El signo menos implica que la dirección de la fuerza del viento es en realidad opuesta a la que supusimos en la figura 5.7. ¡El viento ha cambiado y ahora se opone al movimiento del velero! La fuerza es cero cuando 480 N − (240 N/s)t = 0; esto sucede cuando $t = 2.0$ s, que es cuando el viento dejó momentáneamente de soplar. Cuando $t < 2.0$ s, F_V es positiva y el viento está empujando el velero hacia la derecha en la figura 5.7 (la dirección $+x$). Cuando $t > 2.0$ s, F_V es negativa y el viento está empujando hacia la izquierda.

EVALUAR: La figura 5.8 muestra gráficas de F_V y a_x en función del tiempo. Observe que, en este caso, F_V es la fuerza horizontal neta que actúa sobre el velero. No deberá extrañarnos que la fuerza neta y la aceleración sean directamente proporcionales; según la segunda ley de Newton, *siempre* es así.



5.8 (a) La fuerza neta sobre el velero es directamente proporcional a (b) su aceleración.

Ejemplo 5.8 Movimiento rectilíneo con fricción

Suponga que el viento está soplando otra vez de forma constante en la dirección $+x$, como en el ejemplo 5.6, de modo que el velero tiene una aceleración constante $a_x = 1.5$ m/s^2. Ahora, empero hay una fuerza de fricción horizontal constante con magnitud de 100 N que se opone al movimiento del velero. ¿Qué fuerza F_V debe ejercer el viento sobre el velero?

SOLUCIÓN

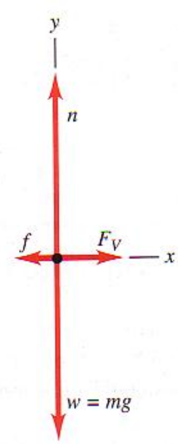
IDENTIFICAR: Una vez más, la incógnita es F_V. Nos dan la aceleración, así que sólo necesitamos la segunda ley de Newton para obtener F_V.

PLANTEAR: La figura 5.9 muestra el nuevo diagrama de cuerpo libre. La única diferencia respecto a la figura 5.7b es la adición de la fuerza de fricción $\vec{f}$, que apunta en la dirección opuesta al movimiento. (Observe que su *magnitud*, f = 100 N, es positiva, pero su *componente* en la dirección x es negativa e igual a $-f$, o sea, −100 N.)

EJECUTAR: Ahora hay dos fuerzas (la del viento y la de fricción) con componente x. La componente x de la segunda ley de Newton da

$$\begin{aligned} \sum F_x &= F_V + (-f) = ma_x \\ F_V &= ma_x + f = (200\ \text{kg})(1.5\ \text{m/s}^2) + (100\ \text{N}) = 400\ \text{N} \end{aligned}$$

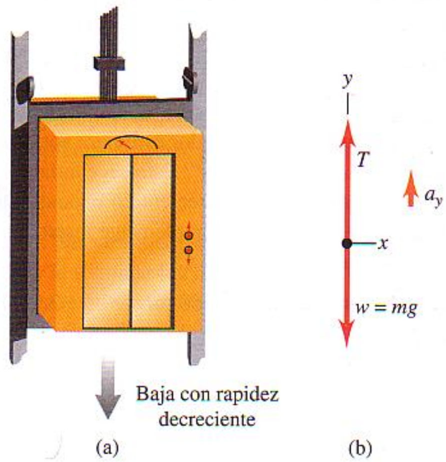
EVALUAR: Debido a la fricción, se requiere una fuerza F_V mayor que la del ejemplo 5.6. Necesitamos 100 N para vencer la fricción y 300 N más para impartir al bote la aceleración requerida.



5.9 Diagrama de cuerpo libre del velero y su tripulante con una fuerza de fricción $\vec{f}$ opuesta al movimiento.

Ejemplo 5.9 Tensión en un cable de elevador

Un elevador y su carga tienen masa total de 800 kg (Fig. 5.10a) y originalmente está bajando a 10.0 m/s; se le detiene con aceleración constante en una distancia de 25.0 m. Calcule la tensión T en el cable de soporte mientras se está deteniendo el elevador.



5.10 (a) Un elevador cargado en descenso se detiene. (b) Diagrama de cuerpo libre del elevador. Al igual que en la figura 5.6, dibujamos el vector de aceleración a un lado del diagrama de cuerpo libre porque la aceleración no es una fuerza.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La incógnita es la tensión T, que obtendremos con la segunda ley de Newton. Al igual que en el ejemplo 5.6, tendremos que determinar la aceleración empleando las fórmulas de aceleración constante.

PLANTEAR: El diagrama de cuerpo libre de la figura 5.10b muestra las únicas fuerzas que actúan sobre el elevador: su peso w y la fuerza de tensión T del cable. El elevador está bajando con rapidez decreciente, así que su aceleración es hacia arriba; escogemos el eje $+y$ en esa dirección.

El elevador se mueve hacia abajo, en la dirección $-y$. Por tanto, su velocidad inicial v_{0y} y su desplazamiento $y - y_0$ son negativos: $v_{0y} = -10.0$ m/s y $y - y_0 = -25.0$ m. La velocidad final es $v_y = 0$. Para obtener la aceleración a_y a partir de esta información, usaremos la ecuación (2.13) en la forma $v_y^2 = v_{0y}^2 + 2a_y(y - y_0)$. Una vez que tengamos a_y, la sustituiremos en la componente y de la segunda ley de Newton [ecuación (5.4)].

EJECUTAR: Escribamos primero la segunda ley de Newton. La fuerza de tensión actúa hacia arriba y el peso lo hace hacia abajo, así que

$$\sum F_y = T + (-w) = ma_y$$

Despejamos la incógnita T:

$$T = w + ma_y = mg + ma_y = m(g + a_y)$$

Para determinar a_y, reacomodamos la ecuación de aceleración constante $v_y^2 = v_{0y}^2 + 2a_y(y - y_0)$:

$$a_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2(y-y_0)} = \frac{(0)^2 - (-10.0\ \text{m/s})^2}{2(-25.0\ \text{m})} = +2.00\ \text{m/s}^2$$

La aceleración es hacia arriba (positiva), como debe ser en el caso de un movimiento hacia abajo con rapidez decreciente.

Ahora podemos sustituir la aceleración en la ecuación de la tensión:

$$T = m(g + a_y) = (800\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2 + 2.00\ \text{m/s}^2)$$
$$= 9440\ \text{N}$$

EVALUAR: Vemos que la tensión debe ser 1600 N *mayor* que el peso ($w = mg = 7480$ N). Esto es lógico: debe haber una fuerza neta hacia arriba que produzca la aceleración hacia arriba que detiene el elevador. ¿Entiende el lector que obtendríamos el mismo valor de T si el elevador estuviera *ascendiendo* y *aumentando* su rapidez a razón de 2.00 m/s^2?

Ejemplo 5.10 Peso aparente en un elevador con aceleración

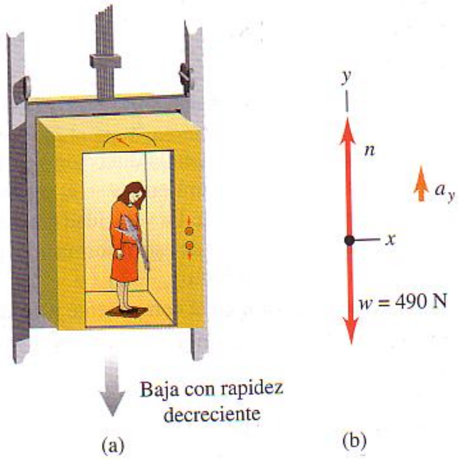
Una mujer de 50.0 kg se para en una báscula dentro del elevador del ejemplo 5.9 (Fig. 5.11a). ¿Qué marca la báscula?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La báscula marca la magnitud de la fuerza hacia abajo ejercida *por* la mujer *sobre* la báscula; por la tercera ley de Newton, esto es igual a la magnitud de la fuerza normal hacia arriba ejercida *por* la báscula *sobre* la mujer. Por tanto, nuestra incógnita es la magnitud n de la fuerza normal.

Obtendremos n aplicando la segunda ley de Newton. Por suerte, ya conocemos la aceleración de la mujer; es la misma que la aceleración del elevador, que calculamos en el ejemplo 5.9.

PLANTEAR: La figura 5.11b es un diagrama de cuerpo libre para la mujer. Las fuerzas que actúan sobre ella son la fuerza normal n ejerci-



5.11 (a) Mujer en el elevador que frena. (b) Diagrama de cuerpo libre de la mujer.

da por la báscula y su peso $w = mg = (50.0\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) = 490$ N. (La fuerza de tensión, que desempeñó un papel protagónico en el ejemplo 5.9, no aparece aquí. Ello se debe a que la tensión no actúa directamente sobre la mujer. Lo que ella siente que empuja hacia arriba contra sus pies es la báscula, *no* el cable del elevador.) Por el ejemplo 5.9, la aceleración de el elevador y la mujer es $a_y = +2.00\ \text{m/s}^2$.

EJECUTAR: La segunda ley de Newton da

$$\sum F_y = n + (-mg) = ma_y$$
$$n = mg + ma_y = m(g + a_y)$$
$$= (50.0\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2 + 2.00\ \text{m/s}^2) = 590\ \text{N}$$

EVALUAR: El valor obtenido para n implica que, mientras el elevador se está deteniendo, la báscula empuja a la mujer con una fuerza de 590 N hacia arriba. Por la tercera ley de Newton, la mujer empuja la báscula hacia abajo con la misma fuerza, así que la báscula marca 590 N, 100 N más que su peso real. La lectura es el **peso aparente** de la mujer; ésta *siente* que el piso empuja con mayor fuerza sus pies que cuando el elevador está parado o se mueve a velocidad constante.

¿Qué sentiría la mujer si el elevador estuviera acelerando *hacia abajo*, de modo que $a_y = -2.00\ \text{m/s}^2$? Esto sucedería si el elevador estuviera subiendo con rapidez decreciente o bajando con rapidez creciente. Para obtener la respuesta simplemente insertamos el nuevo valor de a_y en nuestra ecuación para n:

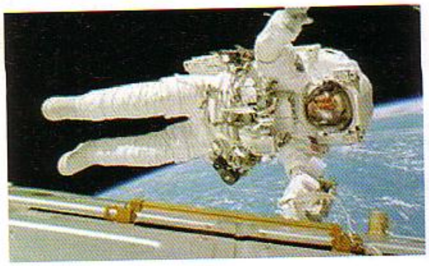
$$n = m(g + a_y) = (50.0\ \text{kg})[9.80\ \text{m/s}^2 + (-2.00\ \text{m/s}^2)]$$
$$= 390\ \text{N}$$

Ahora la mujer siente que pesa sólo 390 N, 100 N *menos* que su peso real.

El lector puede sentir estos efectos dando unos pasos en un elevador que se está frenando después de descender (cuando su peso aparente es mayor que su verdadero peso w) o de ascender (cuando su peso aparente es menor que w).

ActivPhysics ONLINE

2.15 Carrera de automóviles
2.2 Levantar una caja
2.3 Bajar una caja



5.12 Los astronautas en órbita sienten que no tienen peso porque tienen la misma aceleración que su nave, *no* porque estén "fuera del alcance de la gravedad terrestre". (Si así fuera, los astronautas y su nave no permanecerían en órbita, se internarían en el espacio exterior.)

Generalicemos el resultado del ejemplo 5.10. Cuando un pasajero de masa m viaja en un elevador con aceleración vertical a_y, una báscula da como peso aparente del pasajero

$$n = m(g + a_y)$$

Si a_y es positiva, el elevador está acelerando hacia arriba (sube con rapidez creciente o baja con rapidez decreciente) y n es mayor que el peso del pasajero $w = mg$. Si el elevador acelera hacia abajo (sube con rapidez decreciente o baja con rapidez creciente), a_y es negativa y n es menor que w. Si el pasajero no sabe que el elevador está acelerando, sentirá que su peso cambia y de hecho la báscula indica eso.

El caso extremo se da cuando el elevador tiene una aceleración hacia abajo $a_y = -g$, o sea, cuando está en caída libre. En este caso, $n = 0$ y el pasajero *siente* que no tiene peso. Así mismo, un astronauta en órbita experimenta ingravidez aparente (Fig. 5.12). En ambos casos, la persona aún tiene peso, porque actúa sobre ella una fuerza gravitacional, pero el efecto de esta condición de caída libre es el mismo que si el cuerpo estuviera en el espacio exterior sin experimentar gravedad. En ambos casos, la persona y su vehículo (elevador o nave) están cayendo juntos con la misma aceleración g, así que nada empuja a la persona contra el piso o paredes del vehículo.

Una ingravidez aparente prolongada tiene importantes consecuencias fisiológicas para los astronautas. Los fluidos del organismo se redistribuyen, congestionan los senos faciales y causan que las piernas se adelgacen. Los músculos y huesos que normalmente sostienen un peso en la Tierra tienden a deteriorarse, y la consiguiente pérdida ósea puede causar cálculos renales. Los investigadores médicos están explorando formas de aminorar éstos y otros efectos de los vuelos espaciales de larga duración.

ActivPhysics ONLINE

2.4 Despegue de cohete

2.11 Máquina de Atwood modificada

Ejemplo 5.11 Aceleración cuesta abajo

Un tobogán cargado de estudiantes en vacaciones (peso total w) se desliza por una larga cuesta nevada (Fig. 5.13a). La pendiente tiene un ángulo constante α, y el tobogán está tan bien encerado que la fricción es despreciable. ¿Qué aceleración tiene el tobogán?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Nuestra incógnita es la aceleración, que obtendremos aplicando la segunda ley de Newton. No hay fricción, así que las únicas fuerzas que actúan sobre el tobogán son su peso w y la fuerza normal n ejercida por la colina. Lo nuevo de este ejemplo es que la fuerza normal está dirigida con cierto ángulo respecto a la vertical y no es opuesta al peso. Por tanto, deberemos usar ambos componentes de $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ en la ecuación (5.4).

PLANTEAR: La figura 5.13b muestra el diagrama de cuerpo libre. Tomamos ejes paralelo y perpendicular a la colina de modo que la aceleración (que es paralela a la colina) tenga la dirección $+x$.

EJECUTAR: La fuerza normal sólo tiene componente y, pero el peso tiene componentes x y y: $w_x = w \text{ sen } \alpha$ y $w_y = -w \cos \alpha$. (Compare con el ejemplo 5.4, donde la componente x del peso era $-w \text{ sen } \alpha$. La diferencia es que en el ejemplo 5.4 el eje $+x$ era cuesta arriba y aquí es cuesta abajo.) La línea ondulada de la figura 5.13b nos recuerda que descompusimos el peso en sus componentes.

La aceleración es exclusivamente en la dirección $+x$, así que $a_y = 0$. La segunda ley de Newton en forma de componentes nos dice entonces que

$$\sum F_x = w \text{ sen } \alpha = ma_x$$
$$\sum F_y = n - w \cos \alpha = ma_y = 0$$

Dado que $w = mg$, la ecuación para la componente x nos dice que $mg \text{ sen } \alpha = ma_x$, o sea

$$a_x = g \text{ sen } \alpha$$

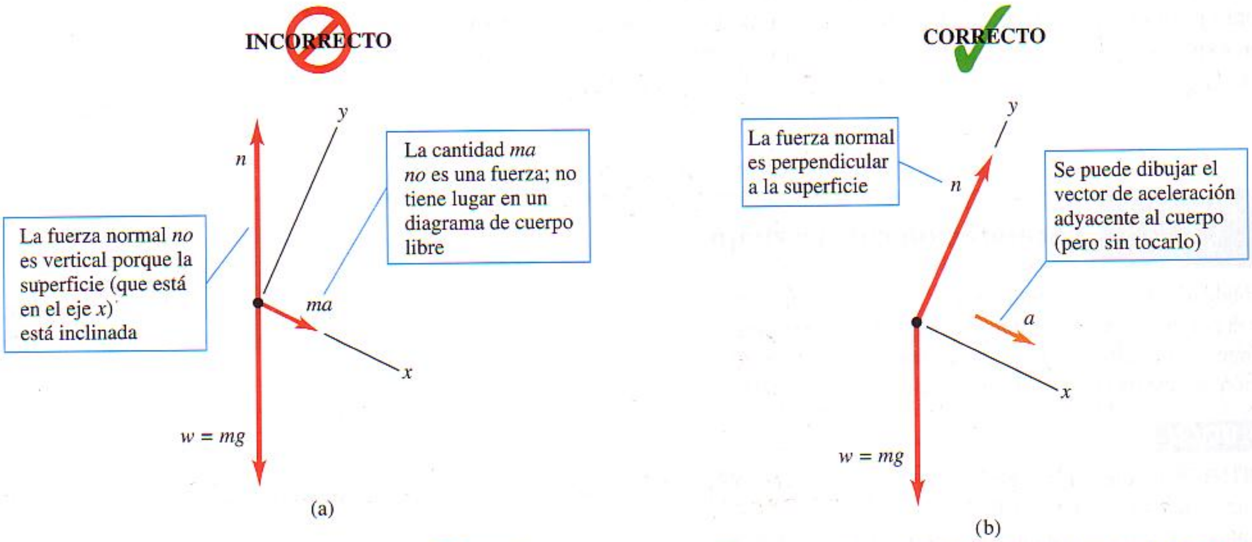
Observe que no necesitamos la ecuación de la componente y para obtener la aceleración. Ésa es la ventaja de escoger el eje x en la dirección de la aceleración. Lo que nos da las componentes y es la magnitud de la fuerza normal que la superficie de la colina ejerce sobre el tobogán:

$$n = w \cos \alpha = mg \cos \alpha$$

EVALUAR: Observe que la masa no aparece en el resultado final. Esto implica que *cualquier* tobogán, sin importar su masa o número de pasajeros, se desliza por una colina sin fricción con aceleración $g \text{ sen } \alpha$. En particular, si el plano es horizontal, $\alpha = 0$ y $a_x = 0$ (el tobogán no se acelera); si el plano es vertical, $\alpha = 90°$ y $a_x = g$ (el tobogán está en caída libre).

(a) (b)

5.13 (a) Un tobogán cargado baja deslizándose por una colina sin fricción. (b) El diagrama de cuerpo libre muestra que la componente x del peso, $w \text{ sen } \alpha$, acelera el tobogán cuesta abajo.



5.14 (a) Diagrama de cuerpo libre incorrecto para el tobogán. (b) Diagrama correcto.

Observe también que la fuerza normal n *no* es igual al peso del tobogán (compare con el ejemplo 5.4 de la sección 5.1). No necesitamos este resultado aquí, pero será útil después.

CUIDADO La figura 5.14a muestra una forma *incorrecta* común de dibujar el diagrama de cuerpo libre del tobogán. Hay dos errores: la fuerza normal debe ser perpendicular a la superficie, y nunca debe incluirse la "fuerza $m\vec{a}$. Si recuerda que "normal" significa "perpendicular" y que la masa multiplicada por la aceleración no es una fuerza, tendrá siempre buenas posibilidades de dibujar diagramas de cuerpo libre correctos (Fig. 5.14b).

Ejemplo 5.12 Dos cuerpos con la misma aceleración

Imagine que empuja una bandeja de 1.00 kg sobre el mostrador de una cafetería con una fuerza constante de 9.0 N. Al moverse, la bandeja empuja un envase de leche de 0.50 kg (Fig. 5.15a). La bandeja y la leche se deslizan sobre una superficie horizontal tan grasosa que se puede hacer caso omiso de la fricción. Obtenga la aceleración del sistema y la fuerza horizontal que la bandeja ejerce sobre la leche.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En este ejemplo hay *dos* incógnitas: la aceleración a_x del sistema bandeja-leche y la fuerza $F_{\text{B sobre L}}$ de la bandeja sobre la leche. Usaremos otra vez la segunda ley de Newton, pero tendremos que aplicarla a dos cuerpos distintos para obtener dos ecuaciones (una para cada incógnita).

PLANTEAR: Hay dos formas de plantear el problema.

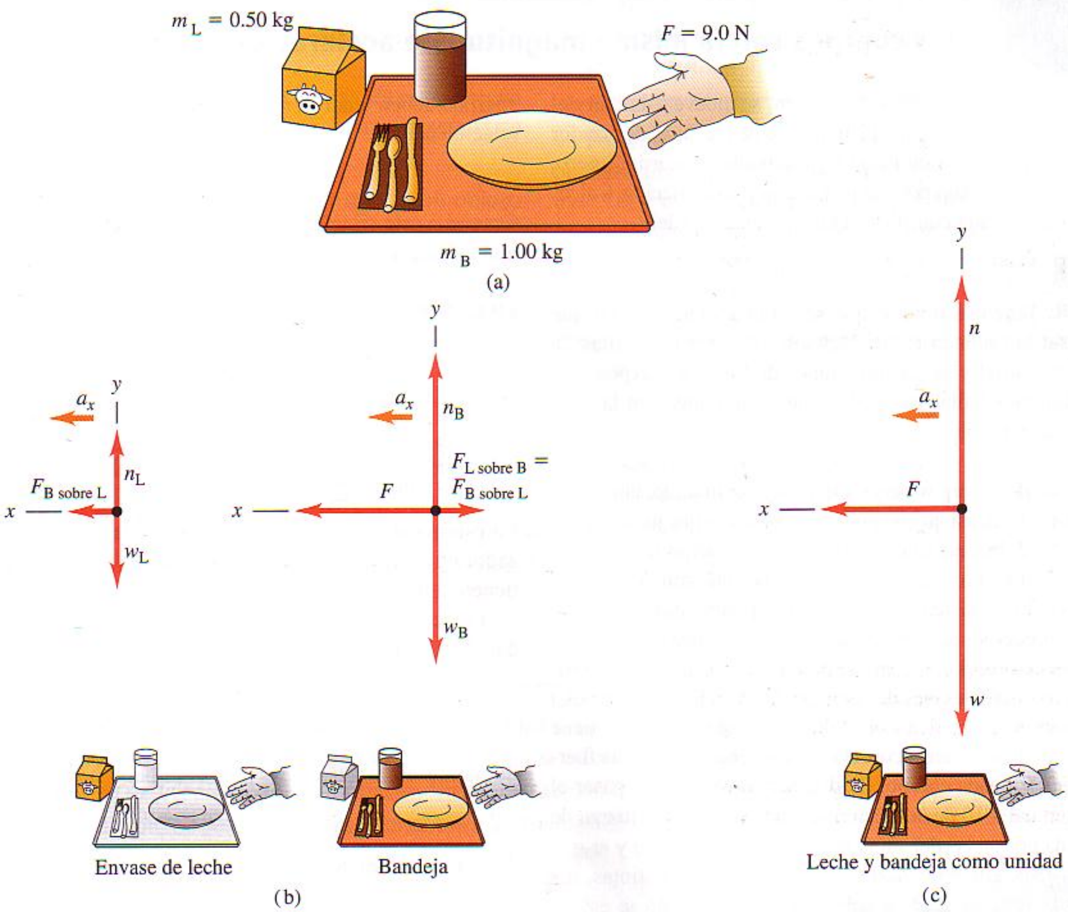
Método 1: Podemos tratar a la bandeja (masa m_B) y a la leche (masa m_L) como cuerpos aparte, cada uno con su propio diagrama de cuerpo libre (Fig. 5.15b). Observe que la fuerza F que usted ejerce sobre la bandeja no aparece en el diagrama de cuerpo libre de la leche. Lo que hace que la leche se acelere es la fuerza de magnitud $F_{\text{B sobre L}}$ que la bandeja ejerce sobre ella. Por la tercera ley de Newton, la leche ejerce una fuerza de igual magnitud sobre la bandeja: $F_{\text{L sobre B}} = F_{\text{B sobre L}}$. Escogemos que la aceleración tenga la dirección $+x$; la bandeja y la leche se mueven con la misma aceleración a_x.

Método 2: Podemos tratar a la bandeja y la leche como un cuerpo compuesto con masa $m = m_B + m_L = 1.50$ kg (Fig. 5.15c). La única fuerza horizontal que actúa sobre este cuerpo compuesto es la fuerza F que usted ejerce. Las fuerzas $F_{\text{B sobre L}}$ y $F_{\text{L sobre B}}$ no intervienen porque son *internas* respecto a este cuerpo compuesto, y la segunda ley de Newton nos dice que sólo las fuerzas *externas* afectan la aceleración de los cuerpos (véase la sección 4.3). Esto implica que necesitaremos una ecuación adicional para determinar la magnitud $F_{\text{B sobre L}}$ si empleamos este método; obtenemos esa ecuación aplicando la segunda ley de Newton al envase de leche, igual que en el método 1.

EJECUTAR: *Método 1:* Las ecuaciones de componente x de la segunda ley de Newton para la bandeja y la leche son

$$\text{Bandeja:}\quad \sum F_x = F - F_{\text{L sobre B}} = F - F_{\text{B sobre L}} = m_B a_x$$
$$\text{Leche:}\quad \sum F_x = F_{\text{B sobre L}} = m_B a_x$$

Así, tenemos dos ecuaciones simultáneas con las incógnitas a_x y $F_{\text{B sobre L}}$. (Sólo necesitamos dos ecuaciones, lo que implica que las



5.15 (a) Se empujan una bandeja y un envase de leche sobre el mostrador de una cafetería. (b) Diagramas de cuerpo libre individuales para la leche (izquierda) y la bandeja (derecha). (c) Diagrama de cuerpo libre para la leche y la bandeja como cuerpo compuesto.

componentes y no desempeñan ningún papel en este ejemplo.) Una forma fácil de resolver las dos ecuaciones es sumarlas; esto elimina $F_{B\ sobre\ L}$ y nos da

$$F = m_B a_x + m_L a_x = (m_B + m_L) a_x$$

y

$$a_x = \frac{F}{m_B + m_L} = \frac{9.0\ \text{N}}{1.00\ \text{kg} + 0.50\ \text{kg}} = 6.0\ \text{m/s}^2$$

Sustituimos este valor en la segunda ecuación (la de la leche) y obtenemos

$$F_{B\ sobre\ L} = m_L a_x = (0.50\ \text{kg})(6.0\ \text{m/s}^2) = 3.0\ \text{N}$$

Método 2: La componente x de la segunda ley de Newton para el cuerpo compuesto con masa m es

$$\sum F_x = F = m a_x$$

y la aceleración de este cuerpo compuesto es

$$a_x = \frac{F}{m} = \frac{9.0\ \text{N}}{1.50\ \text{kg}} = 6.0\ \text{m/s}^2$$

Ahora examinamos el envase de leche solo. Vemos que, si queremos impartirle una aceleración de 6.0 m/s^2, la bandeja deberá ejercer sobre él una fuerza de

$$F_{B\ sobre\ L} = m_L a_x = (0.50\ \text{kg})(6.0\ \text{m/s}^2) = 3.0\ \text{N}$$

EVALUAR: Obtenemos las mismas respuestas con los dos métodos, como debe ser. Para verificar las respuestas, observe que las fuerzas a cada lado de la bandeja son distintas: $F = 9.0$ N a la derecha y $F_{L\ sobre\ B} = 3.0$ N a la izquierda. Por tanto, la fuerza neta horizontal sobre la bandeja es $F - F_{L\ sobre\ B} = 6.0$ N, que es exactamente la que se necesita para acelerar una bandeja de 1.00 kg a 6.0 m/s^2.

El método de tratar los dos cuerpos como un solo cuerpo compuesto funciona *únicamente* si los dos cuerpos tienen la misma aceleración (magnitud *y* dirección). Si las aceleraciones son distintas, deberemos tratar los cuerpos individualmente, como en el ejemplo que sigue.

Ejemplo 5.13 Dos cuerpos con la misma magnitud de aceleración

En la figura. 5.16a, un deslizador de masa m_1 se mueve sobre un riel de aire horizontal sin fricción en el laboratorio de física. El deslizador está conectado a una pesa de masa m_2 mediante un cordel ligero, flexible e inelástico que pasa por una pequeña polea sin fricción. Calcule la aceleración de cada cuerpo y la tensión en el cordel.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Tenemos objetos que se están acelerando, así que deberemos usar la segunda ley de Newton. Hay *tres* incógnitas: la tensión T en el cordel y las aceleraciones de los dos cuerpos. Por tanto, necesitaremos hallar tres ecuaciones simultáneas en las que intervengan esas variables.

PLANTEAR: Los dos cuerpos tienen diferente movimiento, uno vertical y el otro horizontal, así que no podemos considerarlos juntos como en el ejemplo 5.12. Necesitaremos diagramas de cuerpo libre individuales para cada uno. Las figuras 5.16b y 5.16c muestran los diagramas de cuerpo libre y sistemas de ejes correspondientes. Conviene hacer que ambos cuerpos aceleren en la dirección positiva de un eje, así que escogemos la dirección $+y$ para la pesa hacia abajo. (No hay problema si usamos diferentes ejes de coordenadas para los dos cuerpos.)

No hay fricción en la polea y consideramos que el cordel no tiene masa, así que la tensión T en el cordel es homogénea; aplica una fuerza de magnitud T a cada cuerpo. (Podría ser conveniente repasar el ejemplo conceptual 4.10 de la sección 4.5, donde vimos la fuerza de tensión ejercida por un cordel sin masa.) Los pesos son m_1g y m_2g.

Si bien las *direcciones* de las dos aceleraciones son distintas, sus *magnitudes* son iguales. Ello se debe a que el cordel no se estira; por tanto, los dos cuerpos deberán avanzar distancias iguales en tiempos iguales, y sus rapideces en cualquier instante dado deberán ser iguales. Cuando las rapideces cambian, lo hacen en la misma cantidad en un tiempo dado, así que las aceleraciones de los dos cuerpos deben tener la misma magnitud a. Podemos expresar esta relación así

$$a_{1x} = a_{2y} = a$$

Gracias a esta relación, en realidad sólo tenemos *dos* incógnitas: a y la tensión T.

EJECUTAR: Para el deslizador en el riel, la segunda ley de Newton da

$$\text{Deslizador: } \sum F_x = T = m_1 a_{1x} = m_1 a$$
$$\text{Deslizador: } \sum F_y = n + (-m_1 g) = m_1 a_{1y} = 0$$

En el caso de la pesa, las únicas fuerzas actúan en la dirección y, así que

$$\text{Pesa: } \sum F_y = m_2 g + (-T) = m_2 a_{2y} = m_2 a$$

En estas ecuaciones, hemos usado las relaciones $a_{1y} = 0$ (el deslizador no se acelera verticalmente) y $a_{1x} = a_{2y} = a$ (los dos objetos tienen la misma magnitud de aceleración).

La ecuación x para el deslizador y la ecuación para la pesa nos dan dos ecuaciones simultáneas para las incógnitas T y a:

$$\text{Deslizador: } T = m_1 a$$
$$\text{Pesa: } m_2 g - T = m_2 a$$

Sumamos estas ecuaciones para eliminar T nos da:

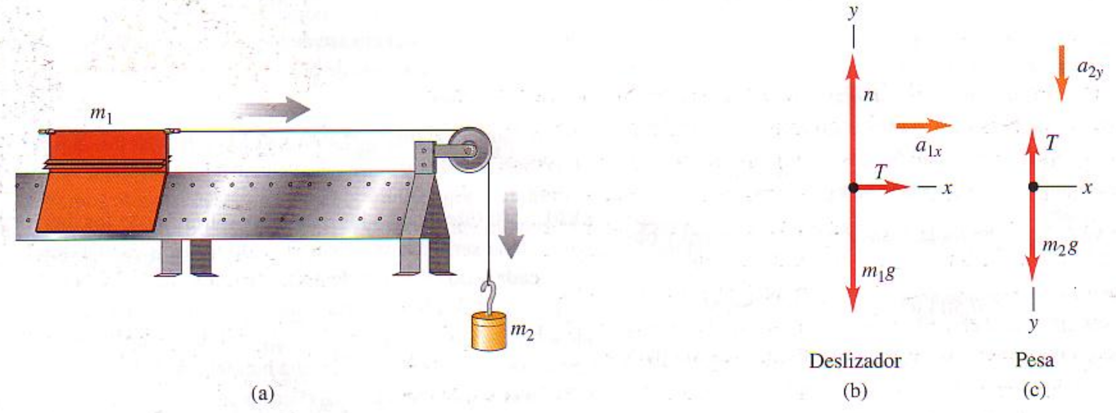
$$m_2 g = m_1 a + m_2 a = (m_1 + m_2)a$$

Así, la magnitud de la aceleración de ambos cuerpos es

$$a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} g$$

Sustituimos esto en la primera ecuación (la del deslizador) para obtener:

$$T = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} g$$



5.16 (a) Una pesa acelera un deslizador por un riel de aire. Diagramas de cuerpo libre para (b) el deslizador (masa m_1) y (c) la pesa (masa m_2).

EVALUAR: La aceleración es menor que g, como cabía esperar; la pesa se acelera más lentamente porque la tensión en el cordel la frena.

La tensión T *no* es igual al peso m_2g de la pesa; es *menor* según el factor $m_1/(m_1 + m_2)$. Si T *fuera* igual a m_2g, la pesa estaría en equilibrio, cosa que no sucede.

CUIDADO Es un error común suponer que, si un objeto está unido a un cordel vertical, la tensión en el cordel debe ser igual al peso del objeto. Era así en el ejemplo 5.5, donde la aceleración era cero, ¡pero la situación es distinta en el presente ejemplo! La única estrategia segura es *siempre* tratar a la tensión como una variable, como lo hicimos aquí.

Por último, revisemos algunos casos especiales. Si $m_1 = 0$, la pesa cae libremente y no hay tensión en el cordel; las ecuaciones dan $T = 0$ y $a = g$ cuando $m_1 = 0$. Por otra parte, si $m_2 = 0$, no esperamos tensión ni aceleración; en este caso las ecuaciones dan $T = 0$ y $a = 0$. Así, en ambos casos especiales, los resultados coinciden con la intuición.

Evalúe su comprensión

Imagine que desciende por una pendiente de 3.0° en un trineo cuyos patines no tienen fricción. La masa combinada de usted y el trineo es de 90 kg. Para controlar la rapidez, usted arrastra los pies en la nieve. ¿Qué fuerza paralela a la pendiente deberá ejercer para que el trineo se frene a razón de 2.0 m/s²?

5.3 | Fuerzas de fricción

Hemos visto varios problemas en los que un cuerpo descansa o se desliza sobre una superficie que ejerce fuerzas sobre el cuerpo, y hemos usado los términos *fuerza normal* y *fuerza de fricción* para describirlas. Siempre que dos cuerpos interactúan por contacto directo de sus superficies, llamamos a las fuerzas de interacción *fuerzas de contacto*. Las fuerzas normal y de fricción son de contacto.

En esta sección nos interesa principalmente la fricción, una fuerza importante en muchos aspectos de nuestra vida. El aceite del motor de un auto reduce la fricción entre piezas móviles, pero sin fricción entre las ruedas y el camino no podría avanzar el coche ni dar vuelta. El arrastre del aire —la fricción ejercida por el aire sobre un cuerpo que se mueve a través de él— reduce el rendimiento del combustible en los autos pero hace que funcionen los paracaídas. Sin fricción, los clavos se saldrían, las bombillas y tapas de frascos se desatornillarían sin esfuerzo y los deportes como el ciclismo y el hockey sobre hielo serían imposibles (Fig. 5.17).

5.17 El hockey sobre hielo depende crucialmente de que exista justo la cantidad correcta de fricción entre los patines de los jugadores y el hielo. Si hubiera demasiada fricción, los jugadores se moverían muy lentamente; si la fricción fuera insuficiente, no podrían evitar caerse.

Fricción cinética y estática

Consideremos un cuerpo que se desliza por una superficie. Si tratamos de deslizar una caja con libros por el piso, no lo lograremos si no aplicamos cierta fuerza mínima. Luego, la caja comienza a moverse y casi siempre podemos mantenerla en movimiento con menos fuerza que la que necesitamos inicialmente. Si sacamos algunos libros, necesitaremos menos fuerza que antes para poner o mantener en movimiento la caja. ¿Qué podemos afirmar en general acerca de este comportamiento?

Primero, cuando un cuerpo descansa o se desliza sobre una superficie, siempre podemos representar la fuerza de contacto que la superficie ejerce sobre el cuerpo en términos de componentes de fuerza perpendiculares y paralelos a la superficie. Como hicimos antes, llamaremos a la componente perpendicular fuerza normal, denotada con $\vec{n}$. El vector componente paralelo a la superficie es la **fuerza de fricción,** denotada con $\vec{f}$. Por definición, $\vec{n}$ y $\vec{f}$ son perpendiculares entre sí. Si la superficie no tiene fricción, la fuerza de contacto *sólo* tendrá componente normal y $\vec{f}$ será cero.

ActivPhysics ONLINE

2.5 Camión que tira de una caja
2.6 Empujar una caja hacia arriba contra una pared
2.7 Esquiador que baja una cuesta
2.8 Esquiador y cuerda de remolque
2.10 Camión que tira de dos cajas

(Las superficies sin fricción son una idealización inasequible, pero podemos aproximarla si los efectos de la fricción son insignificantes.) La dirección de la fuerza de fricción siempre es opuesta al movimiento relativo de las dos superficies.

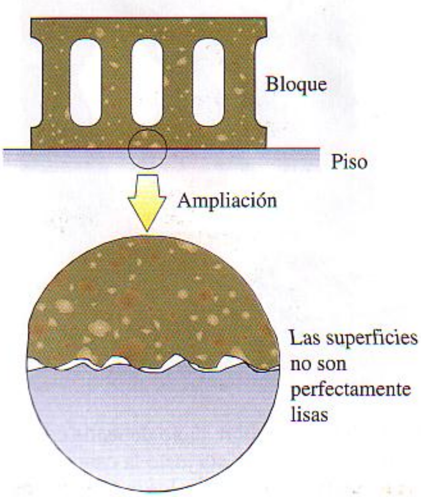
El tipo de fricción que actúa cuando un cuerpo se desliza sobre una superficie es la **fuerza de fricción cinética** $\vec{f}_k$. El adjetivo "cinética" y el subíndice "k" nos recuerdan que las dos superficies se mueven una relativa a la otra. La *magnitud* de esta fuerza suele aumentar al aumentar la fuerza normal. Es por ello que necesitamos más fuerza para deslizar una caja llena de libros que la misma caja vacía. Este principio también se usa en los sistemas de frenos de automóviles; si las zapatas se aprietan con más fuerza contra los discos giratorios, mayor es el efecto de frenado. En muchos casos, la magnitud de la fuerza de fricción cinética f_k experimental es aproximadamente *proporcional* a la magnitud n de la fuerza normal. En tales casos, representamos la relación con la ecuación

$$f_k = \mu_k n \qquad \text{(magnitud de la fuerza de fricción cinética)} \qquad (5.5)$$

donde μ_k es una constante llamada **coeficiente de fricción cinética.** Cuanto más resbalosa es una superficie, menor es el coeficiente. Al ser un cociente de dos magnitudes de fuerza, μ_k es un número puro sin unidades.

CUIDADO Recuerde que las fuerzas de fricción y la normal siempre son perpendiculares. La ecuación (5.5) no es vectorial, sino una relación escalar entre las magnitudes de las dos fuerzas perpendiculares.

La ecuación (5.5) sólo es una representación aproximada de un fenómeno complejo. En el nivel microscópico, las fuerzas de fricción y la normal se deben a las fuerzas intermoleculares (fundamentalmente eléctricas) entre dos superficies ásperas en los puntos en que entran en contacto (Fig. 5.18). El área de contacto real suele ser mucho más pequeña que el área superficial total. Al deslizarse una caja sobre el piso, se forman y rompen enlaces entre las dos superficies, y el número total de enlaces varía; por ello, la fuerza de fricción cinética no es perfectamente constante. Si alisamos las superficies, podríamos aumentar la fricción, pues más moléculas podrían interactuar y enlazarse; juntar dos superficies lisas del mismo metal puede producir una "soldadura fría". Los aceites lubricantes funcionan porque una película de aceite entre dos superficies (como los pistones y cilindros de un motor) evita que entren realmente en contacto.



5.18 Las fuerzas normal y de fricción surgen de interacciones entre moléculas en puntos altos de las superficies del bloque y del piso.

La tabla 5.1 presenta algunos valores representativos de μ_k. Aunque damos dos cifras significativas, son valores aproximados, ya que las fuerzas de fricción también dependen de la *rapidez* del cuerpo relativa a la superficie. Por ahora, haremos caso omiso de este efecto y supondremos que μ_k y f_k son independientes de la rapidez, para concentrarnos en los casos más simples. La tabla 5.1 también da coeficientes de fricción estática, que definiremos en breve.

Las fuerzas de fricción también pueden actuar cuando *no hay* movimiento relativo. Si tratamos de deslizar la caja con libros, tal vez no se mueva porque el piso ejerce una fuerza de fricción igual y opuesta sobre la caja. Ésta se llama **fuerza de fricción estática** $\vec{f}_s$. En la figura 5.19a, la caja está en reposo, en equilibrio, bajo la acción de su peso $\vec{w}$ y la fuerza normal hacia arriba $\vec{n}$. igual en magnitud al peso ($n = w$) y ejercida por el piso sobre la caja. Ahora atamos una cuerda a la caja (Fig. 5.19b) y gradualmente aumentamos la tensión T en ella. Al principio, la caja no se mueve porque, al aumentar T, la fuerza de fricción estática f_s también aumenta (su magnitud se mantiene igual a T).

Tabla 5.1 Coeficientes de fricción aproximados

Materiales	Coeficiente de fricción estática, μ_s	Coeficiente de fricción cinética, μ_k
Acero en acero	0.74	0.57
Aluminio en acero	0.61	0.47
Cobre en acero	0.53	0.36
Latón en acero	0.51	0.44
Zinc en hierro colado	0.85	0.21
Cobre en hierro colado	1.05	0.29
Vidrio en vidrio	0.94	0.40
Cobre en vidrio	0.68	0.53
Teflón en teflón	0.04	0.04
Teflón en acero	0.04	0.04
Hule en concreto (seco)	1.0	0.8
Hule en concreto (húmedo)	0.30	0.25

En algún momento, T se hace mayor que la fuerza de fricción estática f_s máxima que la superficie puede ejercer; la caja "se suelta" (la tensión T puede romper los enlaces entre moléculas de las superficies de la caja y el piso) y comienza a deslizarse. La figura 5.19c es el diagrama de fuerza cuando T tiene este valor crítico. Si T excede el valor, la caja ya no está en equilibrio. Para un par de superficies dado, el valor máximo de f_s depende de la fuerza normal. Los experimentos han revelado que, en muchos casos, dicho valor, llamado $(f_s)_{máx}$, es aproximadamente *proporcional* a n; llamamos **coeficiente de fricción estática** al factor de proporcionalidad μ_s. En la tabla 5.1 se dan valores representativos de μ_s. En una situación dada, la fuerza de fricción estática real puede tener cualquier magnitud entre cero (cuando no hay otra fuerza paralela a la superficie) y un valor máximo dado por $\mu_s n$. En símbolos,

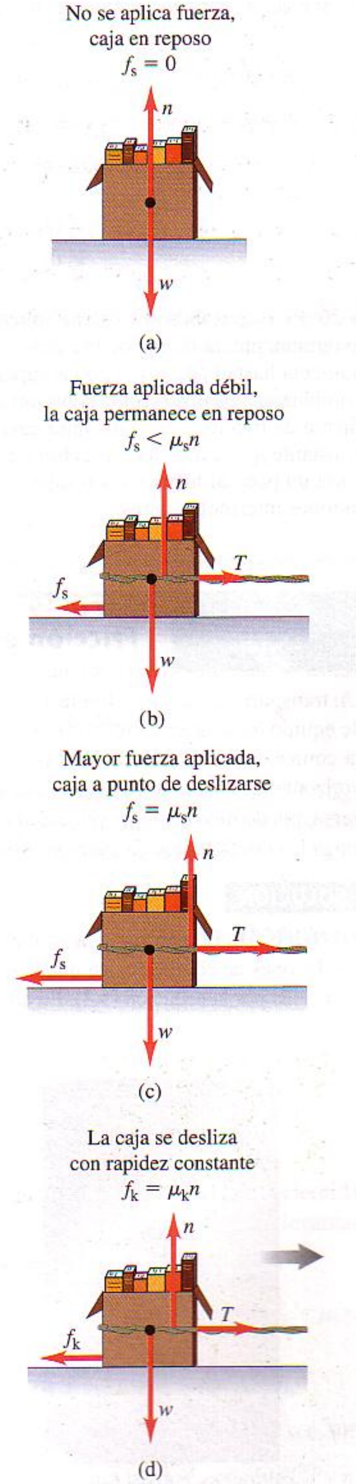
$$f_s \leq \mu_s n \qquad \text{(magnitud de la fuerza de fricción estática)} \qquad (5.6)$$

Al igual que la ecuación (5.5), ésta es una relación entre magnitudes, *no* vectores. La igualdad sólo se cumple cuando la fuerza aplicada T, paralela a la superficie, alcanza el valor crítico en que el movimiento está a punto de comenzar (Fig. 5.19c). Si T es menor (Fig. 5.19b), se cumple la desigualdad y debemos usar las condiciones de equilibrio $\left(\sum \vec{F} = \mathbf{0}\right)$ para obtener f_s. Si no se aplica fuerza ($T = 0$), como en la figura 5.19a, tampoco hay fuerza de fricción estática ($f_s = 0$).

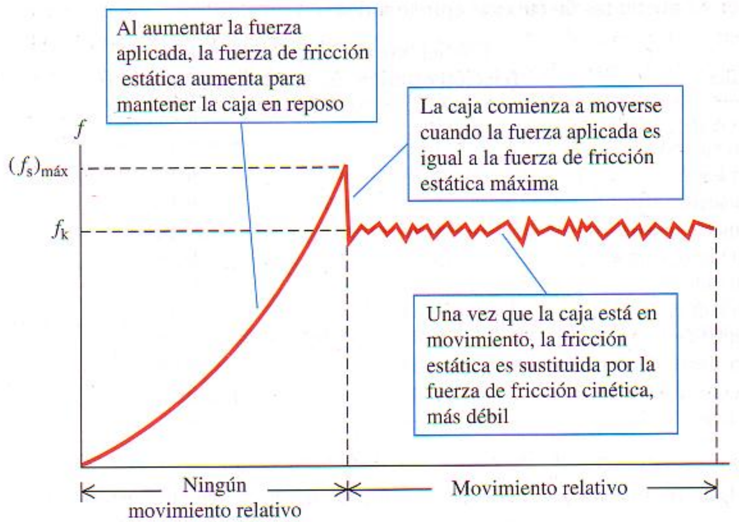
Apenas inicia el deslizamiento (Fig. 5.19d), la fuerza de fricción suele *disminuir;* es más fácil mantener la caja en movimiento que ponerla en movimiento. Por tanto, el coeficiente de fricción cinética suele ser *menor* que el de fricción estática para un par de superficies dado (véase la tabla 5.1). Si comenzamos con cero fuerza aplicada en $t = 0$ y aumentamos gradualmente la fuerza, la fuerza de fricción varía un poco, como se muestra en la figura 5.20.

En algunas situaciones, las superficies se atoran (fricción estática) y deslizan (fricción cinética) de forma alterna. Esto es lo que causa el horrible chirrido de la tiza aplicada con cierto ángulo a un pizarrón, de los limpiaparabrisas cuando el vidrio está casi seco y de los neumáticos deslizándose en el asfalto. Un ejemplo más positivo es el movimiento de un arco de violín contra una cuerda.

Cuando un cuerpo se desliza sobre una capa de gas, la fricción puede reducirse mucho. En el riel de aire empleado en los laboratorios de física, los deslizadores se apoyan en una capa de aire. La fuerza de fricción depende de la velocidad, pero el coeficiente de fricción efectivo normalmente es del orden de 0.001. Un dispositivo similar es la mesa de aire, donde los discos de hockey son sostenidos por una matriz de chorros de aire separados unos 2 cm.



5.19 (a), (b), (c) Si no hay movimiento relativo de las superficies, la magnitud de la fuerza de fricción estática f_s es igual o menor que $\mu_s n$. (d) Si hay movimiento relativo, la magnitud de la fuerza de fricción cinética f_k es igual a $\mu_k n$.



5.20 En respuesta a una fuerza aplicada externamente, la fuerza de fricción aumenta hasta $(f_s)_{máx}$. Luego las superficies comienzan a deslizarse una sobre otra y la fuerza de fricción baja a un valor casi constante f_k. La fuerza de fricción cinética varía un poco al formarse y romperse uniones intermoleculares.

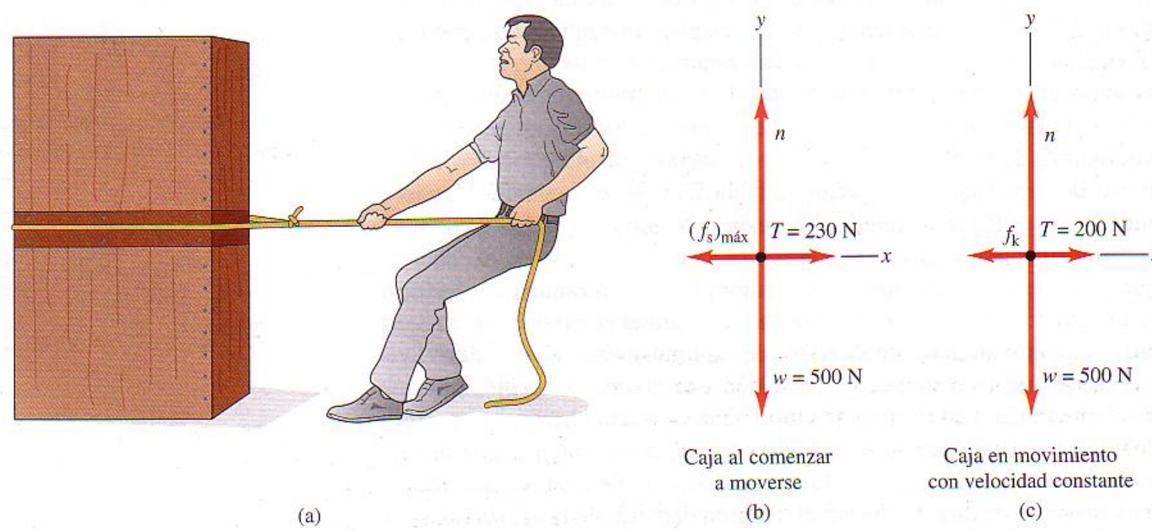
Ejemplo 5.14 Fricción en movimiento horizontal

Un transportista descargó frente a su puerta una caja de 500 N llena de equipo para hacer ejercicio (Fig. 5.21a). Usted descubre que, para comenzar a moverla hacia la cochera, debe tirar con una fuerza horizontal de magnitud de 230 N. Una vez que la caja comienza a moverse, puede mantenerse a velocidad constante con sólo 200 N. Obtenga los coeficientes de fricción estática y cinética.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El reposo y el movimiento con velocidad constante son condiciones de equilibrio, así que usamos la primera ley de Newton expresada por la ecuación (5.2). En ambas situaciones, cuatro fuerzas actúan sobre la caja: la fuerza hacia abajo del peso (magnitud w = 500 N), la fuerza normal hacia arriba (magnitud n) ejercida por el suelo, una fuerza de tensión (magnitud T) a la derecha ejercida por la cuerda y una fuerza de fricción a la izquierda ejercida por el suelo. Las incógnitas son μ_s y μ_k; para obtenerlas, necesitaremos las ecuaciones (5.5) y (5.6), en las que intervienen los coeficientes de fricción.

PLANTEAR: La figura 5.21b muestra el diagrama de cuerpo libre un instante antes de que la caja comience a moverse, cuando la fuerza de fricción estática tiene su valor máximo posible, $(f_s)_{máx} = \mu_s n$. Una vez que la caja se está moviendo hacia la derecha con velocidad



5.21 (a) Se tira de una caja con una fuerza horizontal. (b) Diagrama de cuerpo libre de la caja al comenzar a moverse y (c) moviéndose con velocidad constante.

constante, la fuerza de fricción cambia a su forma cinética (Fig. 5.21c). Dado que la cuerda de la figura 5.21a está en equilibrio, la tensión es la misma en ambos extremos. Por tanto, la fuerza de tensión que la cuerda ejerce sobre la caja tiene la misma magnitud que la fuerza que usted ejerce sobre la cuerda.

EJECUTAR: Justo antes de que la caja comience a moverse, tenemos

$$\sum F_x = T + (-(f_s)_{\text{máx}}) = 0 \quad \text{así que} \quad (f_s)_{\text{máx}} = T = 230\text{ N}$$

$$\sum F_y = n + (-w) = 0 \quad \text{así que} \quad n = w = 500\text{ N}$$

Para obtener el valor de μ_s, usamos la relación $(f_s)_{\text{máx}} = \mu_s n$. Por tanto,

$$\mu_s = \frac{(f_s)_{\text{máx}}}{n} = \frac{230\text{ N}}{500\text{ N}} = 0.46$$

Una vez que la caja está en movimiento, las fuerzas son las que se muestran en la figura 5.21c, y tenemos

$$\sum F_x = T + (-f_k) = 0 \quad \text{así que} \quad f_k = T = 200\text{ N}$$
$$\sum F_y = n + (-w) = 0 \quad \text{así que} \quad n = w = 500\text{ N}$$

Ahora usamos $f_k = \mu_k n$ de la ecuación (5.5):

$$\mu_k = \frac{f_k}{n} = \frac{200\text{ N}}{500\text{ N}} = 0.40$$

EVALUAR: Es más fácil mantener en movimiento la caja que comenzar a moverla, por lo que el coeficiente de fricción cinética es menor que el de fricción estática.

Ejemplo 5.15 La fricción estática puede tener un valor menor que el máximo

En el ejemplo 5.14, ¿qué fuerza de fricción hay si la caja está en reposo y se le aplica una fuerza horizontal de 50 N?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La fuerza aplicada es menor que la fuerza máxima de fricción estática, $(f_s)_{\text{máx}} = 230$ N. Por tanto, la caja permanece en reposo y la fuerza neta que actúa sobre ella es cero. La incógnita es la magnitud f_s de la fuerza de fricción.

PLANTEAR: El diagrama de cuerpo libre es el mismo de la figura 5.21b, pero sustituyendo $(f_s)_{\text{máx}}$ por f_s y sustituyendo $T = 230$ N por $T = 50$ N.

EJECUTAR: Por las condiciones de equilibrio [ecuación (5.2)], tenemos

$$\sum F_x = T + (-f_s) = 0 \quad \text{así que} \quad f_s = T = 50\text{ N}$$

EVALUAR: En este caso, f_s es menor que el valor máximo, $(f_s)_{\text{máx}} = \mu_s n$. La fuerza de fricción puede impedir el movimiento con cualquier fuerza horizontal aplicada menor que 230 N.

Ejemplo 5.16 Reducción de la fricción cinética al mínimo

En el ejemplo 5.14, suponga que ata una cuerda a la caja y tira de ella con un ángulo de 30° sobre la horizontal (Fig. 5.22a). ¿Qué fuerza debe aplicar para mantener la caja en movimiento con velocidad constante? ¿Es esto más fácil o difícil que tirar horizontalmente? Suponga $w = 500$ N y $\mu_k = 0.40$.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La caja está en equilibrio porque su velocidad es constante, así que aplicamos la primera ley de Newton. Puesto que la caja está en movimiento, el suelo ejerce una fuerza de fricción *cinética*. La incógnita es la magnitud T de la fuerza de tensión.

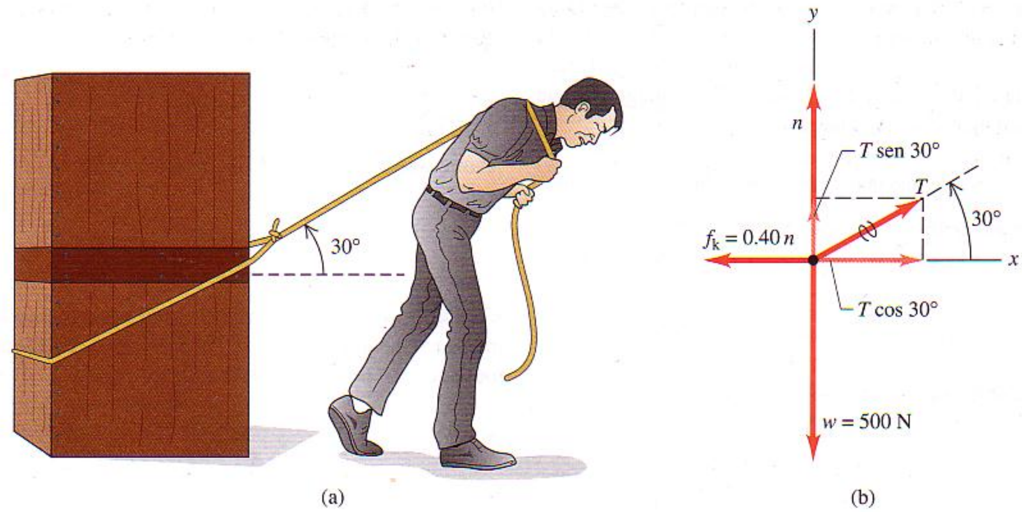
PLANTEAR: La figura 5.22b es un diagrama de cuerpo libre que muestra las fuerzas que actúan sobre la caja. La fuerza de fricción cinética f_k sigue siendo igual a $\mu_k n$, pero ahora la fuerza normal n no es igual en magnitud al peso de la caja. La fuerza ejercida por la cuerda tiene una componente vertical que tiende a levantar la caja del piso.

EJECUTAR: Por las condiciones de equilibrio y la ecuación $f_k = \mu_k n$, tenemos

$$\sum F_x = T\cos 30° + (-f_k) = 0 \quad \text{así que} \quad T\cos 30° = \mu_k n$$
$$\sum F_y = T\operatorname{sen} 30° + n + (-w) = 0 \quad \text{así que} \quad n = w - T\operatorname{sen} 30°$$

Tenemos dos ecuaciones simultáneas para las dos incógnitas, T y n. Para resolverlas, podemos eliminar una incógnita y despejar la otra. Hay muchas formas de hacerlo; una es sustituir en la primera ecuación la expresión para n, obtenida de la segunda ecuación:

$$T\cos 30° = \mu_k(w - T\operatorname{sen} 30°)$$



5.22 (a) Se tira de una caja aplicando una fuerza con un ángulo hacia arriba. (b) Diagrama de cuerpo libre de la caja moviéndose a velocidad constante.

Ahora despejamos T de esta ecuación para obtener

$$T = \frac{\mu_k w}{\cos 30° + \mu_k \text{ sen } 30°} = 188 \text{ N}$$

Por último, sustituimos este resultado en cualquiera de las ecuaciones originales para calcular n. Si usamos la segunda ecuación, obtendremos

$$n = w - T \text{ sen } 30° = (500 \text{ N}) - (188 \text{ N}) \text{ sen } 30° = 406 \text{ N}$$

EVALUAR: La fuerza normal es *menor* que el peso de la caja (w = 500 N) porque la componente vertical de la tensión tira de la caja hacia arriba. Aun así, la tensión requerida es un poco menor que la de 200 N que es preciso aplicar cuando se tira horizontalmente (ejemplo 5.14). Pruebe tirar a 22°; verá que necesita aún menos fuerza (véase el problema de desafío 5.123).

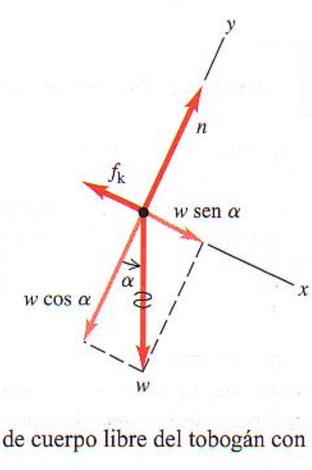
Ejemplo 5.17 Tobogán con fricción I

Volvamos al tobogán del ejemplo 5.11 (sección 5.2). La cera se raspó y ahora hay un coeficiente de fricción cinética μ_k. La ladera tiene justo el ángulo necesario para que el tobogán baje con rapidez constante. Deduzca una expresión para el ángulo en términos de w y μ_k.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La incógnita es el ángulo α de la pendiente. El tobogán está en equilibrio porque su velocidad es constante, así que usamos otra vez la primera ley de Newton. Tres fuerzas actúan sobre el tobogán: su peso, la fuerza normal y la fuerza de fricción cinética. Puesto que el movimiento es cuesta abajo, la fuerza de fricción cinética (que se opone a dicho movimiento) está dirigida cuesta arriba. La magnitud de la fuerza de fricción está dada por la ecuación (5.5), $f_k = \mu_k n$.

PLANTEAR: La figura 5.23 es el diagrama de cuerpo libre. Tomamos ejes perpendicular y paralelo a la superficie y descomponemos el peso en sus componentes en estas dos direcciones, como se muestra. (Compare con la Fig. 5.13b del ejemplo 5.11.)



5.23 Diagrama de cuerpo libre del tobogán con fricción.

EJECUTAR: Las condiciones de equilibrio son

$$\sum F_x = w \text{ sen } \alpha + (-f_k) = w \text{ sen } \alpha - \mu_k n = 0$$
$$\sum F_y = n + (-w \cos \alpha) = 0$$

(Usamos la relación $f_k = \mu_k n$ en la ecuación para las componentes x.) Reacomodando, obtenemos

$$\mu_k n = w \operatorname{sen} \alpha \quad \text{y} \quad n = w \cos \alpha$$

Igual que en el ejemplo 5.11, la fuerza normal n *no* es igual al peso w. Si dividimos la primera ecuación entre la segunda, obtenemos

$$\mu_k = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \quad \text{así que} \quad \alpha = \arctan \mu_k$$

EVALUAR: El peso w no aparece en esta expresión. *Cualquier* tobogán, pese lo que pese, bajará una pendiente con rapidez constante si el coeficiente de fricción cinética es igual a la tangente del ángulo de inclinación de la pendiente. Cuanto mayor sea el coeficiente de fricción, más empinada deberá ser la pendiente para que el tobogán se deslice con velocidad constante. Esto es justo lo esperado.

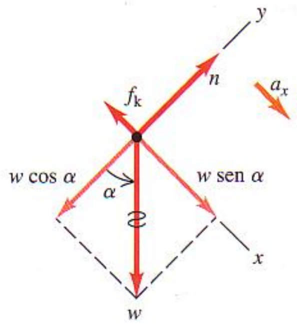
Ejemplo 5.18 Tobogán con fricción II

¿Qué sucedería si el mismo tobogán con el mismo coeficiente de fricción se desliza colina abajo como en el ejemplo 5.17, pero la colina es más empinada? Ahora el tobogán se acelera, aunque no tanto como en el ejemplo 5.11, donde no había fricción. Deduzca una expresión para la aceleración en términos de g, α, μ_k y w.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El tobogán ya no está en equilibrio, pues tiene una aceleración al bajar por la ladera. Por tanto, es preciso usar la segunda ley de Newton, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$, en su forma de componentes [ecuación (5.4)]. La incógnita es la aceleración cuesta abajo.

PLANTEAR: El diagrama de cuerpo libre (Fig. 5.24) es casi el mismo que para el ejemplo 5.17. La componente y de la aceleración del tobogán, a_y sigue siendo cero, pero la componente x, a_x, no lo es.



5.24 Diagrama de cuerpo libre del tobogán con fricción, bajando por una ladera más empinada.

EJECUTAR: Nos conviene expresar el peso como $w = mg$. Entonces, utilizando la segunda ley de Newton para las componentes x y y de la fuerza, tendremos

$$\sum F_x = mg \operatorname{sen} \alpha + (-f_k) = ma_x$$
$$\sum F_y = n + (-mg \cos \alpha) = 0$$

De la segunda ecuación y la ecuación (5.5), obtenemos una expresión para f_k:

$$n = mg \cos \alpha$$
$$f_k = \mu_k n = \mu_k mg \cos \alpha$$

Sustituimos esto en la ecuación de la componente x. El resultado es

$$mg \operatorname{sen} \alpha + (-\mu_k mg \cos \alpha) = ma_x$$
$$a_x = g(\operatorname{sen} \alpha - \mu_k \cos \alpha)$$

EVALUAR: ¿Es lógico este resultado? Podemos verificar algunos casos especiales. Primero, si la ladera es *vertical*, $\alpha = 90°$, $\operatorname{sen} \alpha = 1$, $\cos \alpha = 0$ y $a_x = g$. Esto es caída libre, lo esperado. Segundo, en una ladera con ángulo α *sin* fricción, $\mu_k = 0$ y $a_x = g \operatorname{sen} \alpha$. Ésta es la situación del ejemplo 5.11 y obtenemos el mismo resultado; ¡vamos bien! Ahora supongamos que hay la fricción justa para que el tobogán se mueva con rapidez constante. En tal caso, $a_x = 0$ y nuestro resultado da

$$\operatorname{sen} \alpha = \mu_k \cos \alpha \quad \text{y} \quad \mu_k = \tan \alpha$$

Esto concuerda con nuestro resultado del ejemplo 5.17; ¡qué bien! Por último, podría haber tanta fricción que $\mu_k \cos \alpha$ fuera mayor que $\operatorname{sen} \alpha$. En tal caso, a_x sería negativa. Si damos al tobogán un empujón cuesta abajo para ponerlo en movimiento, se frenará y finalmente se detendrá.

Prácticamente hemos exprimido el problema del tobogán, y esto nos enseña una importante lección. Partimos de un problema sencillo y lo extendimos a situaciones cada vez más generales. Nuestro resultado más general, el de este ejemplo, incluye *todos* los anteriores como casos especiales, así que es muy útil. No memorice este resultado; sólo sirve para este tipo de problemas. Simplemente trate de entender cómo se obtuvo y qué significa.

Una última variación que el lector podría probar es el caso en que se da al tobogán un empujón inicial colina arriba. La dirección de la fuerza de fricción cinética se invierte, así que la aceleración es distinta del valor de bajada. Resulta que la expresión para a_x es la misma que para la bajada, sólo que el signo menos cambia a más. ¿Puede demostrarlo?

Fricción de rodamiento

Es mucho más fácil mover un archivero lleno de documentos sobre un piso horizontal usando un carrito con ruedas que deslizándolo. ¿Qué tanto más fácil es? Podemos definir un **coeficiente de fricción de rodamiento** μ_r, que es la fuerza horizontal necesaria para lograr rapidez constante en una superficie plana, dividida entre la fuerza normal ejercida por la superficie. Los ingenieros de transporte llaman a μ_r *resistencia a la tracción*, y tiene un valor típico de 0.002 a 0.003 para ruedas de acero en rieles de acero y 0.01 a 0.02 para ruedas de caucho en concreto. Estos valores explican en parte por qué el combustible suele rendir más en los ferrocarriles que en los camiones.

Ejemplo 5.19 Movimiento con fricción de rodamiento

Un auto común pesa unos 12 000 N. Si el coeficiente de fricción de rodamiento es $\mu_r = 0.015$, ¿qué fuerza horizontal hay que aplicar para impulsar el auto con rapidez constante en un camino horizontal? Haga caso omiso de la resistencia del aire.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El auto se mueve con velocidad constante, así que tenemos un problema de equilibrio y usaremos la primera ley de Newton. Las cuatro fuerzas que actúan sobre el auto son el peso, la fuerza normal hacia arriba, la fuerza hacia atrás de la fricción de rodamiento y la fuerza desconocida hacia adelante F (la incógnita).

PLANTEAR: El diagrama de cuerpo libre se parece mucho al de la figura 5.21c del ejemplo 5.14; sólo hay que sustituir la fuerza de fricción cinética por la fuerza de fricción de rodamiento f_r, y la fuerza de tensión, por la fuerza desconocida F.

EJECUTAR: Al igual que en el ejemplo 5.14, la primera ley de Newton para las componentes *verticales* nos dice que la fuerza normal tiene la misma magnitud que el peso. Por la definición de μ_r, la fuerza de fricción de rodamiento f_r es

$$f_r = \mu_r n = (0.015)(12{,}000\ \text{N}) = 180\ \text{N} \quad (\text{unas } 41\ \text{lb})$$

La primera ley de Newton para las componentes *horizontales* nos dice que se requiere una fuerza hacia adelante de esta magnitud para que el auto avance con rapidez constante.

EVALUAR: La fuerza requerida no es grande, y es por ello que podemos empujar un automóvil averiado. (Al igual que en el caso del deslizamiento, es más fácil mantener rodando un auto que hacer que comience a rodar.) Hemos hecho caso omiso de los efectos de la resistencia del aire, lo cual es una buena aproximación si el coche se mueve lentamente. Sin embargo, a velocidades de autopista, la resistencia del aire es un efecto más importante que la fricción de rodamiento.

Aplique este análisis a la caja del ejemplo 5.14. Si el transportista la trae sobre un gato rodante con ruedas de hule ($\mu_r = 0.02$), sólo necesitará una fuerza de 10 N para mantenerla en movimiento a velocidad constante. ¿Puede verificarlo?

Resistencia de fluidos y rapidez terminal

Si saca la mano por la ventanilla de un coche que viaja con gran rapidez constatará la existencia de la **resistencia de fluidos**, la fuerza que un fluido (gas o líquido) ejerce sobre un cuerpo que se mueve a través de él. El cuerpo ejerce una fuerza sobre el fluido para hacerlo a un lado. Por la tercera ley de Newton, el fluido responde con una fuerza igual y opuesta.

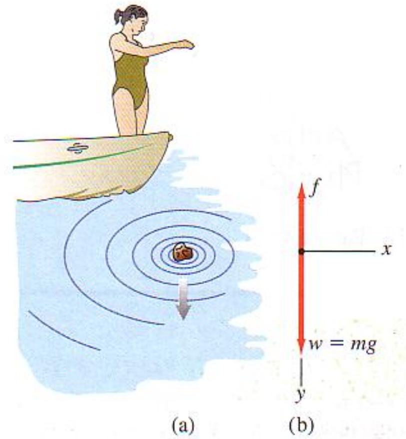
La *dirección* de la fuerza resistiva o de arrastre siempre es opuesta a la de la velocidad del cuerpo relativa al fluido. La *magnitud* de dicha fuerza suele aumentar al aumentar la rapidez del cuerpo en el fluido. Contraste este comportamiento con el de la fuerza de fricción cinética entre dos superficies en contacto, que casi siempre podemos considerar independiente de la rapidez. A rapidez baja, la magnitud f de la fuerza resistiva del fluido es aproximadamente proporcional a la rapidez v del cuerpo:

$$f = kv \qquad (\text{resistencia del fluido a baja rapidez}) \tag{5.7}$$

donde k es una constante que depende de la forma y tamaño del cuerpo y las propiedades del fluido. En movimiento en aire con la rapidez de una pelota de tenis lanzada o una rapidez mayor, la fuerza resistiva es aproximadamente proporcional a v^2, no v, y se denomina **arrastre del aire** o sólo *arrastre*. Los aviones, gotas de lluvia y autos que avanzan con gran rapidez experimentan arrastre del aire. En este caso sustituimos la ecuación (5.7) por

$$f = Dv^2 \qquad \text{(resistencia de fluidos a alta velocidad)} \qquad (5.8)$$

Por la dependencia de v^2, el arrastre aumenta rápidamente con la rapidez. El arrastre sobre un auto común es insignificante a bajas velocidades pero comparable con, o mayor que, la resistencia a la tracción a velocidades de autopista. El valor de D depende de la forma y tamaño del cuerpo y de la densidad del aire. Verifique que las unidades de k en la ecuación (5.7) son $N \cdot s/m$ o kg/s y que las unidades de D en la ecuación (5.8) son $N \cdot s^2/m^2$ o kg/m.



5.25 (a) Una piedra cae a través de un fluido (agua). (b) Diagrama de cuerpo libre de la piedra.

Por los efectos de la resistencia de fluidos, un objeto que cae en un fluido *no* tiene aceleración constante. Para describir el movimiento, no podemos usar las relaciones de aceleración constante del capítulo 2; debemos partir de la segunda ley de Newton. Consideremos esta situación: soltamos una roca en la superficie de un estanque profundo, y cae hasta el fondo (Fig. 5.25a). En este caso, la fuerza resistiva del fluido está dada por la ecuación (5.7). ¿Cómo cambian la aceleración, velocidad y posición de la roca con el tiempo?

El diagrama de cuerpo libre se muestra en la figura 5.25b. Tomamos la dirección y positiva hacia abajo y hacemos caso omiso de cualquier fuerza asociada a la flotación en el agua. Puesto que la piedra se mueve hacia abajo, la rapidez v es igual a la componente y de la velocidad, v_y, y la fuerza resistiva del fluido tiene la dirección $-y$. No hay componentes x, así que la segunda ley de Newton da

$$\sum F_y = mg + (-kv_y) = ma_y$$

Al principio, $v_y = 0$, la fuerza resistiva es cero y la aceleración es $a_y = g$. Al aumentar la rapidez, aumenta la fuerza resistiva hasta ser igual en magnitud al peso. Ahora, $mg - kv_y = 0$, la aceleración es cero y ya no aumenta la rapidez. La rapidez final v_t, llamada **rapidez terminal**, está dada por $mg - kv_t = 0$, o sea

$$v_t = \frac{mg}{k} \qquad \text{(rapidez terminal, resistencia del fluido } f = kv\text{)} \qquad (5.9)$$

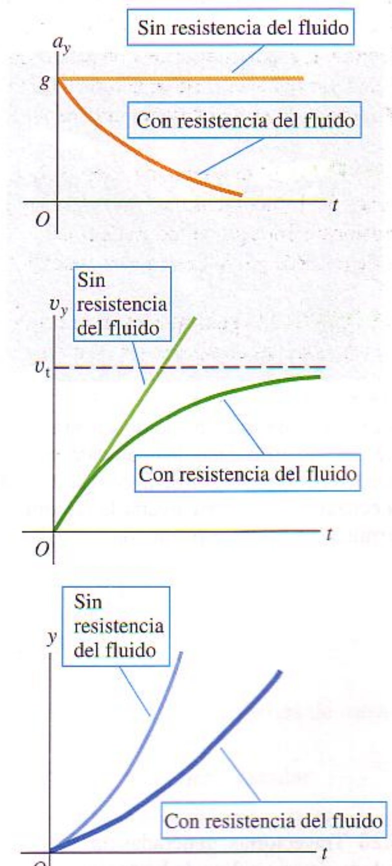
La figura 5.26 muestra cómo varían la aceleración, la velocidad y la posición con el tiempo. Al pasar el tiempo, la aceleración se acerca a cero y la velocidad se acerca a v_t (recuerde que escogimos la dirección $+y$ hacia abajo). La pendiente de la gráfica de y contra t se hace constante al hacerse constante la velocidad.

Para ver de dónde salen las curvas de la figura 5.26, debemos obtener la relación entre rapidez y tiempo en el intervalo antes de alcanzarse la rapidez terminal. Volvemos a la segunda ley de Newton, que escribimos así

$$m\frac{dv_y}{dt} = mg - kv_y$$

Después de reacomodar términos y sustituir mg/k por v_t, integramos ambos miembros, recordando que $v_y = 0$ cuando $t = 0$:

$$\int_0^v \frac{dv_y}{v_y - v_t} = -\frac{k}{m}\int_0^t dt$$



5.26 Gráficas de aceleración, velocidad y posición contra tiempo para un cuerpo que cae con resistencia del fluido proporcional a la rapidez (curvas oscuras) y sin resistencia del fluido (curvas claras).

que ya integrada da

$$\ln\frac{v_t - v_y}{v_t} = -\frac{k}{m}t \quad \text{o} \quad 1 - \frac{v_y}{v_t} = e^{-(k/m)t}$$

Activ Online Physics

2.12 Paracaidista

y por último

$$v_y = v_t\left[1 - e^{-(k/m)t}\right] \tag{5.10}$$

Observe que v_y se hace igual a la rapidez terminal v_t sólo en el límite donde $t \to \infty$; la roca no puede alcanzar la velocidad terminal en un intervalo de tiempo finito.

La derivada de v_y da a_y en función del tiempo, y la integral de v_y da y en función del tiempo. Dejamos la derivación al lector (véase el ejercicio 5.40); los resultados son

$$a_y = ge^{-(k/m)t} \tag{5.11}$$

$$y = v_t\left[t - \frac{m}{k}\left(1 - e^{-(k/m)t}\right)\right] \tag{5.12}$$

Examine otra vez la figura 5.26, que muestra las gráficas de estas tres relaciones.

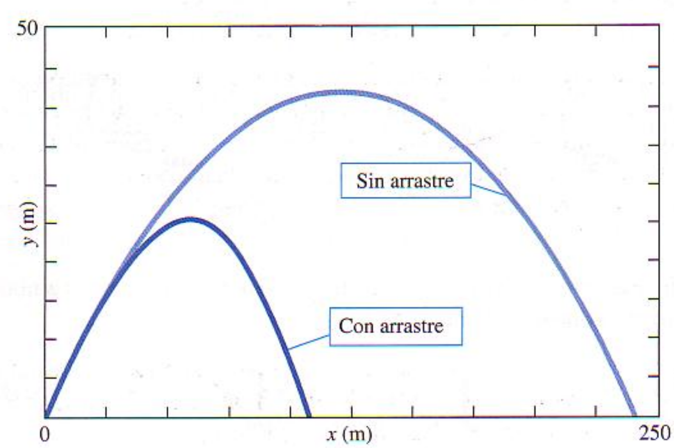
Al deducir la rapidez terminal en la ecuación (5.9) supusimos que la fuerza resistiva del fluido era proporcional a la rapidez. En el caso de un objeto que cae con gran rapidez en aire, de modo que la resistencia del fluido es proporcional a v^2 como en la ecuación (5.8), puede demostrarse que la rapidez terminal está dada por

$$v_t = \sqrt{\frac{mg}{D}} \qquad (\text{rapidez terminal, resistencia de fluido } f = Dv^2) \tag{5.13}$$

Esta expresión explica la observación de que los objetos pesados tienden a caer con mayor rapidez en aire que los ligeros. Dos objetos con el mismo tamaño pero diferente masa (digamos, una pelota de ping-pong y una bola de acero del mismo radio) tienen la misma D pero diferente valor de m. El objeto con mayor masa tiene mayor rapidez terminal y cae más rápidamente. La misma idea explica por qué una hoja de papel cae más rápidamente si primero la hacemos bola; la masa es la misma, pero el tamaño más pequeño reduce D (menos arrastre para una rapidez dada) y aumenta v_t. Los paracaidistas usan el mismo principio para controlar su descenso (Fig. 5.27).

5.27 Al cambiar de posición sus brazos y piernas mientras caen, los paracaidistas pueden alterar el valor de la constante D de la ecuación (5.8) y así ajustar la rapidez terminal de su caída [ecuación (5.13)].

La figura 5.28 muestra la trayectoria de una pelota de béisbol con y sin arrastre del aire, suponiendo un coeficiente $D = 1.3 \times 10^{-3}$ kg/m (apropiado para una



5.28 Trayectorias, generadas por computadora, de una pelota de béisbol (masa 0.145 kg, radio 0.0366 m) lanzada con un ángulo de 35° sobre la horizontal con una rapidez de 50 m/s. Las dos curvas muestran las trayectorias con y sin arrastre del aire. Observe que las escalas de los ejes horizontal y vertical son distintas.

pelota bateada o un lanzamiento rápido y un parque en el nivel del mar). En este ejemplo, se imprimió a la pelota una velocidad inicial de 50 m/s con un ángulo 35° por arriba de la horizontal. Puede verse que tanto el alcance de la pelota como la altura máxima alcanzada son considerablemente menores que los resultados obtenidos cuando se hace caso omiso del arrastre. Así, la trayectoria que calculamos en el ejemplo 3.8 (Sección 3.3) es muy poco realista. El arrastre del aire es un factor importante en el juego de béisbol.

Ejemplo 5.20

Rapidez terminal de un paracaidista

Para un cuerpo humano que cae en aire con brazos y piernas estirados (Fig. 5.27), el valor numérico de la constante D de la ecuación (5.8) es de aproximadamente 0.25 kg/m. Obtenga la rapidez terminal de un paracaidista de 80 kg.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Usamos la ecuación (5.13) para obtener la incógnita v_t.

EJECUTAR: Obtenemos

$$v_t = \sqrt{\frac{mg}{D}} = \sqrt{\frac{(80\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)}{0.25\ \text{kg/m}}}$$

$$= 56\ \text{m/s (unos 200 km/h)}$$

EVALUAR: Dado que la rapidez terminal es muy alta, la fase de caída de un paracaidista no dura mucho. Una caída de 2800 m hasta la superficie sólo tarda (2800 m)/(56 m/s) = 50 s.

Cuando el paracaidista abre su paracaídas, el valor de D aumenta considerablemente y la rapidez terminal del hombre y el paracaídas se reduce drásticamente, a mucho menos de 56 m/s.

Evalúe su comprensión

Imagine otra vez que desciende en trineo una ladera con pendiente de 3.0°. La masa combinada de usted y el trineo es de 90 kg. Esta vez no arrastra los pies y el trineo se acelera a razón de 0.25 m/s². Calcule el coeficiente de fricción cinética entre la nieve y los patines del trineo.

5.4 | Dinámica del movimiento circular

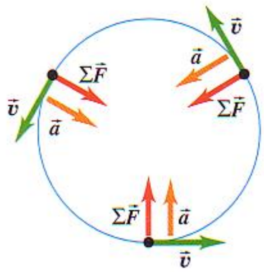
ActivPhysics ONLINE

4.2 Resolución de problemas de movimiento circular
4.3 Carrito en camino circular
4.4 Pelota que oscila colgada de un cordel
4.5 Coche que da vuelta a una pista

Vimos el movimiento circular uniforme en la sección 3.4, mostrando que, cuando una partícula se mueve en un círculo con rapidez constante, su aceleración siempre es hacia el centro del círculo (perpendicular a la velocidad instantánea). La magnitud a_{rad} de la aceleración es constante y está dada en términos de la rapidez v y el radio R del círculo por

$$a_{rad} = \frac{v^2}{R} \tag{5.14}$$

El subíndice "rad" nos recuerda que la aceleración siempre es radial hacia el centro del círculo, perpendicular a la velocidad instantánea. En la sección 3.4 explicamos por qué se le denomina *aceleración centrípeta.*



5.29 En el movimiento circular uniforme, tanto la aceleración como la fuerza neta están dirigidas hacia el centro del círculo.

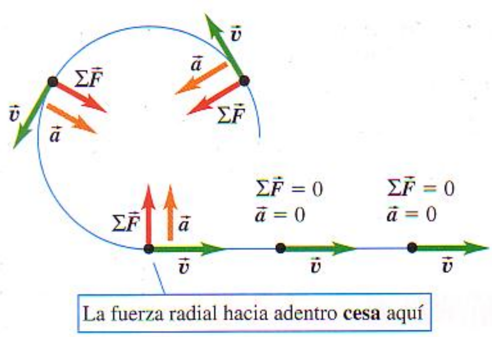
También podemos expresar la aceleración centrípeta a_{rad} en términos del *periodo* T, el tiempo que tarda una revolución:

$$T = \frac{2\pi R}{v} \tag{5.15}$$

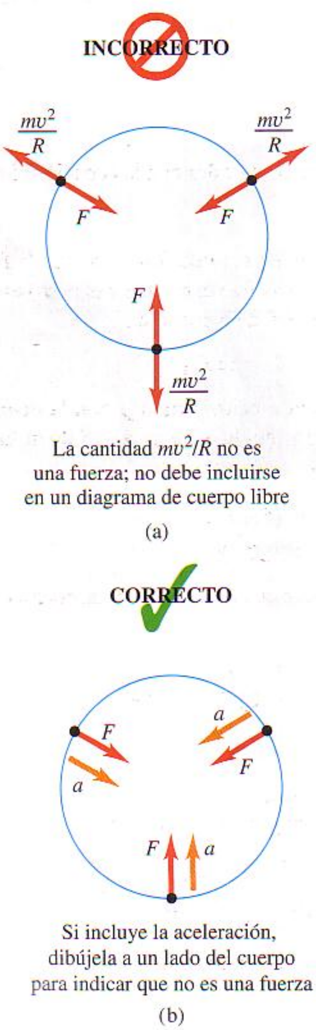
En términos del periodo, a_{rad} es

$$a_{rad} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} \tag{5.16}$$

El movimiento circular uniforme, como todos los movimientos de una partícula, se rige por la segunda ley de Newton. La aceleración hacia el centro del círculo debe ser causada por una o varias fuerzas, tales que la resultante $\sum\vec{F}$ sea un vector dirigido siempre hacia el centro (Fig. 5.29). La magnitud de la aceleración es constante, así que la magnitud F_{neta} de la fuerza neta radial también debe serlo. Si un patinador hace girar a su compañera en el hielo, debe tirar constantemente de ella hacia el centro del círculo; si la suelta, ya no actuará la fuerza hacia adentro y ella saldrá disparada en una línea recta tangente al círculo (Fig. 5.30).



5.30 Si la fuerza radial hacia adentro repentinamente deja de actuar sobre un cuerpo en movimiento circular, el cuerpo sale disparado en línea recta con velocidad constante (lo cual es lógico, pues la fuerza neta que actúa sobre él es cero).



5.31 Diagramas de cuerpo libre (a) incorrecto y (b) correcto para un cuerpo en movimiento circular uniforme.

La magnitud de la aceleración radial está dada por $a_{rad} = v^2/R$, así que la magnitud de la fuerza radial neta hacia adentro sobre una partícula de masa m debe ser

$$F_{neta} = ma_{rad} = m\frac{v^2}{R} \tag{5.17}$$

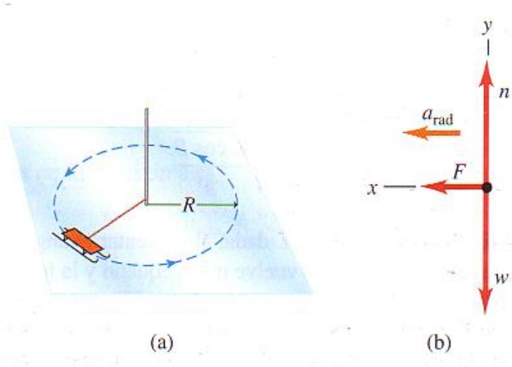
El movimiento circular uniforme puede ser resultado de *cualquier* combinación de fuerzas que produzca una fuerza neta $\sum\vec{F}$ de magnitud constante dirigida hacia el centro del círculo.

CUIDADO Al resolver problemas de movimiento circular uniforme, el lector podría sentirse tentado a incluir una fuerza adicional hacia afuera de magnitud $m(v^2/R)$ para "mantener el cuerpo en equilibrio"; solemos llamar "fuerza centrífuga" ("que huye del centro") a semejante fuerza. Resista la tentación, porque ese enfoque es totalmente erróneo (véase la Fig. 5.31a). En primer lugar, el cuerpo *no* está en equilibrio; está en movimiento constante en un camino circular.

Puesto que su velocidad está cambiando constantemente de dirección, el cuerpo está acelerando. En segundo lugar, si hubiera una fuerza adicional hacia afuera ("centrífuga") para equilibrar la fuerza hacia adentro, no habría fuerza neta hacia adentro para causar el movimiento circular, y el cuerpo se movería en línea recta, no en un círculo (Fig. 5.30). Y, en tercer lugar, la cantidad $m(v^2/R)$ no es una fuerza; corresponde al lado $m\vec{a}$ de $\sum\vec{F} = m\vec{a}$, y no aparece en $\sum\vec{F}$ (Fig. 5.31b). Si bien es cierto que un pasajero en un auto que sigue una curva de un camino horizontal tiende a deslizarse hacia fuera de la curva, como respondiendo a una "fuerza centrífuga", tal pasajero está en un marco de referencia no inercial en el que no son válidas la primera y segunda leyes de Newton. Como vimos en la sección 4.2, lo que realmente sucede es que el pasajero tiende a seguir moviéndose en línea recta, y el costado del auto "choca" con el pasajero cuando el auto da vuelta (Fig. 4.8c). *En un marco de referencia inercial no existe ninguna "fuerza centrífuga"*. No volveremos a mencionar este término, y le recomendamos no usarlo nunca.

Ejemplo 5.21 Fuerza en movimiento circular uniforme

Un trineo de 25.0 kg descansa en una plancha horizontal de hielo prácticamente sin fricción. Está unida con una cuerda de 5.00 m a un poste clavado en el hielo. Una vez que se le da un empujón, el trineo da vueltas uniformemente alrededor del poste (Fig. 5.32a). El trineo efectúa cinco revoluciones completas cada minuto. Calcule la fuerza F que la cuerda ejerce sobre él.



5.32 (a) Trineo en movimiento circular uniforme en una superficie horizontal sin fricción. (b) Diagrama de cuerpo libre del trineo. La dirección $+x$ apunta hacia el centro del círculo.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El trineo está en movimiento circular uniforme, así que tiene una aceleración radial. Aplicaremos al trineo la forma de componentes de la segunda ley de Newton para determinar la magnitud F de la fuerza que la cuerda ejerce (la incógnita).

PLANTEAR: La figura 5.32b es el diagrama de cuerpo libre del trineo. La aceleración sólo tiene componente x: hacia el centro del círculo. Por tanto, la denotamos con a_{rad}. No nos dan la aceleración, así que tendremos que determinar su valor con la ecuación (5.14) o con la (5.16).

EJECUTAR: No hay aceleración en la dirección y, así que la fuerza neta en esa dirección (la suma de la fuerza normal y el peso) es cero. Para la dirección x, la segunda ley de Newton da

$$\sum F_x = F = ma_{rad}$$

Podemos obtener la aceleración centrípeta a_{rad} con la ecuación (5.16). El trineo se mueve en un círculo de radio $R = 5.00$ m, con un periodo $T = (60.0\text{ s})/(5\text{ rev}) = 12.0$ s, así que

$$a_{rad} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \frac{4\pi^2(5.00\text{ m})}{(12.0\text{ s})^2} = 1.37\text{ m/s}^2$$

O bien, podemos usar primero la ecuación (5.15) para obtener la rapidez v:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2\pi(5.00\text{ m})}{12.0\text{ s}} = 2.62\text{ m/s}$$

Luego, usando la ecuación (5.14),

$$a_{rad} = \frac{v^2}{R} = \frac{(2.62\text{ m/s})^2}{5.00\text{ m}} = 1.37\text{ m/s}^2$$

Por tanto, la magnitud F de la fuerza ejercida por la cuerda es

$$F = ma_{rad} = (25.0\text{ kg})(1.37\text{ m/s}^2)$$
$$= 34.3\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2 = 34.3\text{ N}$$

EVALUAR: Se necesitaría una fuerza mayor si el trineo diera vueltas al círculo con mayor rapidez. De hecho, si v aumentara al doble sin cambiar R, F sería cuatro veces mayor. ¿Puede demostrarlo? ¿Cómo cambiaría F si v no cambiara pero el radio R aumentara al doble?

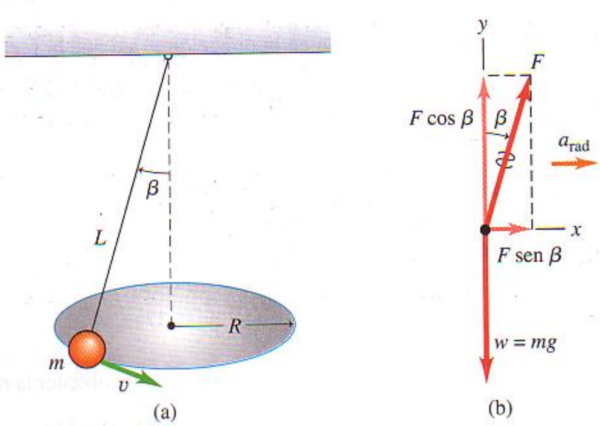
Ejemplo 5.22 El péndulo cónico

Un inventor que se atreve a ser diferente propone fabricar un reloj de péndulo usando una pesa de masa m colgada de un alambre delgado de longitud L. En vez de oscilar, la pesa se mueve en un círculo horizontal con rapidez constante v, con el alambre formando un ángulo constante β con la vertical (Fig. 5.33a). Suponiendo que se conoce el ángulo β, calcule la tensión F en el alambre y el periodo T (el tiempo de una revolución de la masa).

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Para obtener las dos incógnitas —la tensión F y el periodo T— necesitamos dos ecuaciones simultáneas, que serán las componentes horizontal y vertical de la segunda ley de Newton aplicada a la pesa. Obtendremos la aceleración de la pesa hacia el centro del círculo utilizando una de las ecuaciones para movimiento circular.

PLANTEAR: La figura. 5.33b muestra el diagrama de cuerpo libre de la masa como un sistema de coordenadas. Las fuerzas sobre la pesa en la posición que se muestra son el peso mg y la tensión F en el alambre. El centro de la trayectoria circular es el centro del área sombreada, *no* el extremo superior del alambre. La componente horizontal de la tensión es la fuerza que produce la aceleración horizontal (hacia el centro del círculo).



5.33 (a) La pesa en el extremo del alambre tiene movimiento circular uniforme. (b) Diagrama de cuerpo libre de la pesa. La dirección $+x$ es hacia el centro del círculo.

EJECUTAR: La tensión tiene una componente horizontal F sen β y una componente vertical $F \cos \beta$. El sistema no tiene aceleración vertical; la aceleración horizontal está dirigida al centro del círculo, así que usamos el símbolo a_{rad}. Las ecuaciones $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ son

$$\sum F_x = F \operatorname{sen} \beta = ma_{rad}$$
$$\sum F_y = F \cos \beta + (-mg) = 0$$

Tenemos dos ecuaciones simultáneas para las incógnitas F y β. La ecuación para $\sum F_y$ da $F = mg/\cos \beta$; si sustituimos esto en la ecuación de $\sum F_x$ y usando $(\operatorname{sen} \beta)/(\cos \beta) = \tan \beta$, tendremos

$$\tan \beta = \frac{a_{rad}}{g}$$

Para relacionar β con el periodo T, usamos la ecuación (5.16) para a_{rad}. El radio del círculo es $R = L \operatorname{sen} \beta$, así que

$$a_{rad} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \frac{4\pi^2 L \operatorname{sen} \beta}{T^2}$$

Sustituyendo esto en $\tan \beta = a_{rad}/g$, tenemos

$$\tan \beta = \frac{4\pi^2 L \operatorname{sen} \beta}{gT^2}$$

que podemos reescribir así:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L \cos \beta}{g}}$$

EVALUAR: Para una longitud L dada, al aumentar el ángulo β, cos β disminuye, el periodo T se vuelve más pequeño y la tensión $F = mg/\cos \beta$ aumenta. El ángulo nunca puede ser 90°, pues ello requeriría $T = 0$, $F = \infty$ y $v = \infty$. Este sistema se llama *péndulo cónico* porque el alambre describe un cono; no sería muy buen reloj porque el periodo depende de forma demasiado directa de β.

Ejemplo 5.23 Vuelta a una curva plana

El auto BMW Z4 del ejemplo 3.12 (sección 3.4) va por una curva sin peralte de radio R (Fig. 5.34a). Si el coeficiente de fricción entre las ruedas y el camino es μ_s, ¿cuál es la rapidez máxima $v_{máx}$ con que puede tomarse la curva sin derrapar?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La aceleración del auto al tomar la curva tiene magnitud $a_{rad} = v^2/R$, así que la rapidez máxima corresponde a la aceleración máxima, la cual a su vez corresponde a la fuerza horizontal máxima sobre el coche hacia el centro del camino circular. La única fuerza horizontal que actúa sobre el auto es la fuerza de fricción ejercida por el camino; por tanto, atacaremos el problema usando la segunda ley de Newton y lo que aprendimos acerca de la fuerza de fricción en la sección 5.3.

PLANTEAR: El diagrama de cuerpo libre de la figura. 5.34b incluye el peso del coche, $w = mg$ y dos fuerzas de contacto ejercidas por el camino: la fuerza normal (magnitud n) y la fuerza de fricción horizontal (magnitud f). La fuerza de fricción debe apuntar en la dirección $+x$ (hacia el centro del camino circular) para causar la aceleración radial. Puesto que el auto no se mueve en la dirección radial (es decir, no se desliza hacia el centro del círculo ni en la dirección opuesta), la fuerza de fricción es *estática* con una magnitud máxima $f_{\text{máx}} = \mu_s n$ [véase la ecuación (5.6)].

EJECUTAR: La aceleración hacia el centro del camino circular es $a_{\text{rad}} = v^2/R$ y no hay aceleración vertical. Entonces,

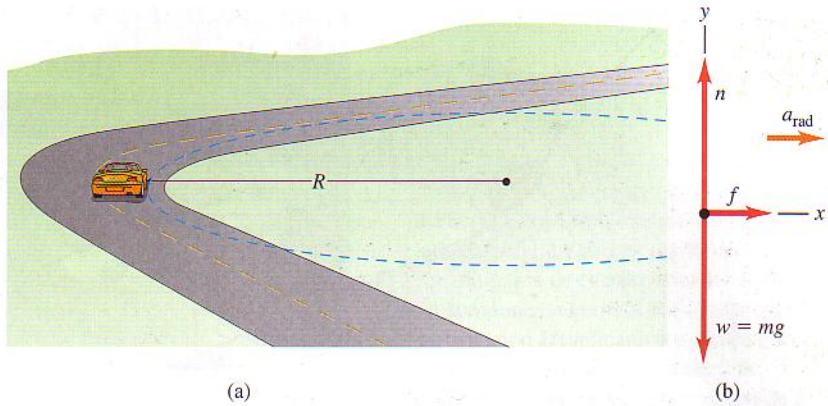
$$\sum F_x = f = ma_{\text{rad}} = m\frac{v^2}{R}$$
$$\sum F_y = n + (-mg) = 0$$

La segunda ecuación muestra que $n = mg$. La primera muestra que la fuerza de fricción *necesaria* para mantener el auto en su trayectoria circular aumenta con la rapidez del auto. Sin embargo, la fuerza máxima de fricción *disponible* es $f_{\text{máx}} = \mu_s n = \mu_s mg$, y esto determina la rapidez máxima del auto. Si sustituimos $f_{\text{máx}}$ por f y $v_{\text{máx}}$ por v en la ecuación de $\sum F_x$ tenemos

$$\mu_s mg = m\frac{v_{\text{máx}}^2}{R}$$

así que la rapidez máxima es

$$v_{\text{máx}} = \sqrt{\mu_s gR}$$



5.34 (a) Un auto deportivo toma una curva de un camino plano. (b) Diagrama de cuerpo libre del auto. La dirección $+x$ es hacia el centro del camino circular.

Por ejemplo, si $\mu_s = 0.87$ y $R = 230$ m, entonces

$$v_{\text{máx}} = \sqrt{(0.87)(9.8\ \text{m/s}^2)(230\ \text{m})} = 44\ \text{m/s}$$

lo que equivale a casi 160 km/h. Ésta es la rapidez máxima para el radio.

EVALUAR: Si la rapidez del auto es menor que $\sqrt{\mu_s gR}$, la fuerza de fricción requerida es *menor* que el valor máximo $f_{\text{máx}} = \mu_s mg$ y el auto puede tomar la curva fácilmente. Si tratamos de tomar la curva con una rapidez *mayor* que la máxima, el auto aún podrá describir un círculo sin derrapar, pero el radio será mayor y el auto se saldrá del camino.

Cabe señalar que la aceleración centrípeta máxima (la "aceleración lateral" del ejemplo 3.12) es $\mu_s g$. Si se reduce el coeficiente de fricción, la aceleración centrípeta máxima y $v_{\text{máx}}$ también se reducen. Por eso, es mejor tomar las curvas a menor velocidad si el camino está mojado o tiene hielo (pues ambas cosas reducen el valor de μ_s).

Ejemplo 5.24 Tomar una curva peraltada

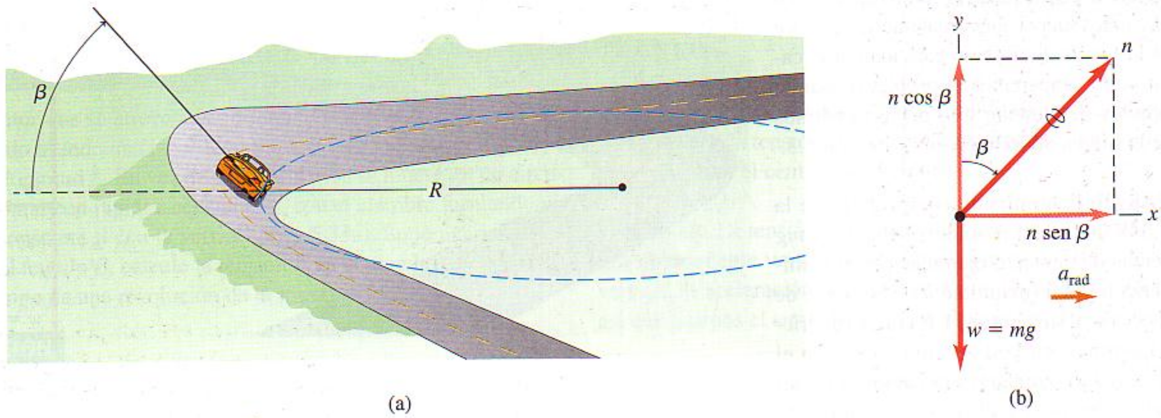
Es posible peraltar una curva con un ángulo tal que los coches que viajan con cierta rapidez no necesiten fricción para mantener el radio con que dan vuelta. El auto podría tomar la curva aun sobre hielo húmedo con ruedas de teflón. Las carreras de trineos se basan en la misma idea. Un ingeniero propone reconstruir la curva del ejemplo 5.23 de modo que un auto con rapidez v pueda dar la vuelta sin peligro aunque no haya fricción (Fig. 5.35a). ¿Qué ángulo de peralte β debe tener la curva?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Al no haber fricción, las únicas dos fuerzas que actúan sobre el coche son su peso y la fuerza normal. Puesto que el camino tiene peralte, la fuerza normal (que actúa perpendicular a la superficie del camino) tiene una componente horizontal. Esta componente es la que produce la aceleración centrípeta del auto (la cual tiene dirección horizontal, hacia el centro del camino circular que el auto sigue). Puesto que intervienen fuerzas y aceleración, usaremos la segunda ley de Newton para obtener la incógnita β.

PLANTEAR: El diagrama de cuerpo libre (Fig. 5.35b) es muy similar al del péndulo cónico del ejemplo 5.22 (Fig. 5.33b). La fuerza normal que actúa sobre el coche desempeña el papel de la tensión que actúa sobre la pesa del péndulo.

EJECUTAR: La fuerza normal $\vec{n}$ es perpendicular al camino y forma un ángulo β respecto a la vertical; por tanto, tiene una componente vertical $n \cos \beta$ y una componente horizontal n sen β, como se



5.35 (a) Un auto toma una curva peraltada. Si el ángulo de peralte β es el correcto, no se necesitará fricción para tomar la curva con rapidez v. (b) Diagrama de cuerpo libre del auto. La dirección $+x$ es hacia el centro del camino circular del auto.

aprecia en la figura 5.35. La aceleración en la dirección x es la aceleración centrípeta; no hay aceleración en la dirección y. Entonces, las ecuaciones de la segunda ley de Newton son

$$\sum F_x = n \operatorname{sen} \beta = ma_{rad}$$
$$\sum F_y = n \cos \beta + (-mg) = 0$$

De la ecuación $\sum F_y$, $n = mg/\cos \beta$. Si sustituimos esto en la ecuación $\sum F_x$ obtenemos una expresión para el ángulo de peralte:

$$\tan \beta = \frac{a_{rad}}{g}$$

que es la misma expresión que obtuvimos en el ejemplo 5.23. Por último, si sustituimos la expresión $a_{rad} = v^2/R$, obtenemos

$$\tan \beta = \frac{v^2}{gR}$$

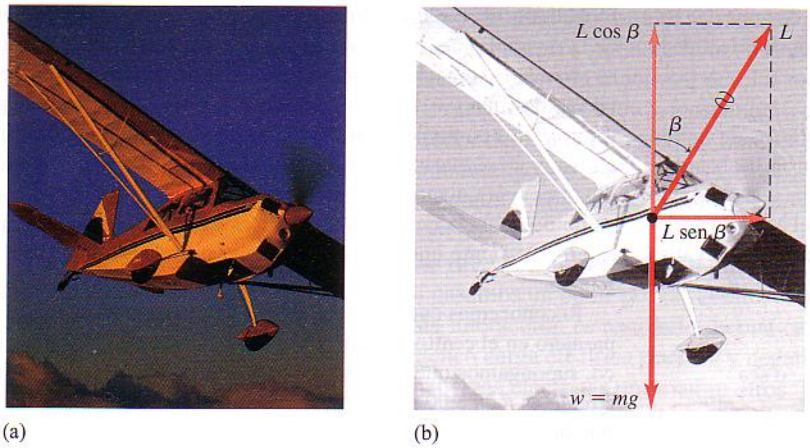
EVALUAR: El ángulo depende de la rapidez y el radio. Para un radio dado, no hay un ángulo correcto para todas las rapideces. Al diseñar autopistas y ferrocarriles, lo usual es peraltar las curvas para la rapidez media del tráfico. Si $R = 230$ m y $v = 25$ m/s (correspondiente a una rapidez de autopista de 88 km/h), entonces

$$\beta = \arctan \frac{(25 \text{ m/s})^2}{(9.8 \text{ m/s}^2)(230 \text{ m})} = 15°$$

Este resultado está dentro del intervalo de peraltes usados en autopistas reales. Con el mismo radio y $v = 44$ m/s, como en el ejemplo 5.23, $\beta = 41°$; hay curvas con tanto peralte en las pistas de carreras.

Los resultados del ejemplo 5.24 también son válidos para un avión cuando da vuelta mientras vuela horizontalmente (Fig. 5.36a). Cuando un avión vuela en línea recta con rapidez constante y sin variar su altitud, su peso se equilibra exactamente con la fuerza de sustentación $\vec{L}$ producida por las alas. (En realidad, lo que ejerce realmente la fuerza de sustentación es el aire: al moverse las alas a través del aire, lo empujan hacia abajo; por la tercera ley de Newton, el aire empuja las alas hacia arriba.) Para hacer que el avión dé vuelta, el piloto lo inclina hacia un lado (Fig. 5.36a) para que la fuerza de sustentación tenga una componente horizontal, como en la figura 5.36b. (El piloto también altera el ángulo con que las alas "muerden" el aire de modo que la componente vertical de la sustentación siga equilibrando el peso.) El ángulo de ladeo está relacionado con la rapidez v del avión y con el radio R de la vuelta por la misma expresión que vimos en el ejemplo 5.24: $\tan \beta = v^2/gR$. Si se quiere que el avión dé una vuelta cerrada (R pequeño) con gran rapidez (v grande), $\tan \beta$ deberá ser grande, así que el ángulo de ladeo requerido β se acercará a 90°.

También podemos aplicar los resultados del ejemplo 5.24 al *piloto* de un avión. El diagrama de cuerpo libre del piloto es idéntico al de la figura 5.35b; el asiento ejerce la fuerza normal $n = mg/\cos \beta$ sobre el piloto. Al igual que en el ejemplo



5.36 (a) Un avión se inclina hacia un lado para dar un giro en esa dirección. (b) Diagrama de cuerpo libre del avión. La componente vertical de la fuerza de sustentación $\vec{L}$ (aplicada por el aire que empuja el ala) equilibra la fuerza de gravedad; la componente horizontal de $\vec{L}$ causa la aceleración v^2/R.

5.10, n es igual al peso aparente del piloto, que es mucho mayor que su peso real mg. En una vuelta cerrada con ángulo de ladeo β grande, el peso aparente del piloto puede ser enorme: $n = 5.8mg$ con $\beta = 80°$ y $9.6mg$ con $\beta = 84°$. Los pilotos llegan a desmayarse en tales vueltas porque el peso aparente de la sangre aumenta en la misma proporción y el corazón no es lo bastante fuerte como para bombear al cerebro una sangre aparentemente tan "pesada".

Movimiento en un círculo vertical

En todos los ejemplos anteriores, el cuerpo se movía en un círculo horizontal. El movimiento en un círculo vertical no es diferente en principio, pero hay que tratar con cuidado el peso del cuerpo. El ejemplo que sigue ilustra esa necesidad.

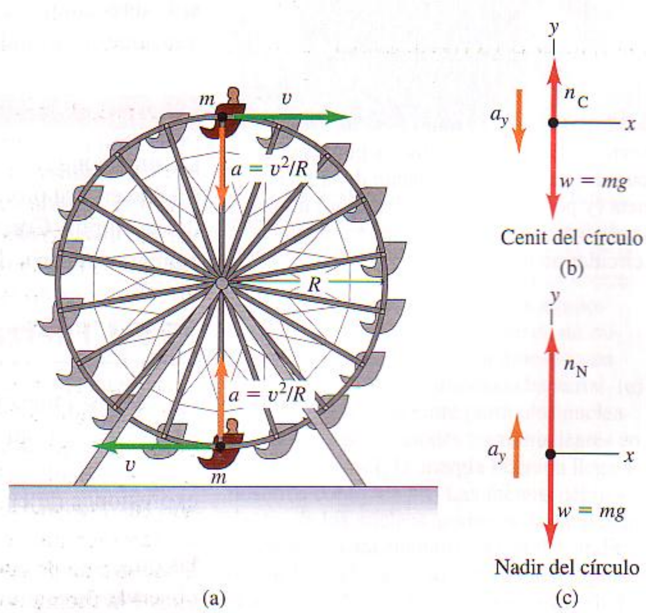
Ejemplo 5.25 Movimiento circular uniforme en un círculo vertical

Un pasajero de una rueda de la fortuna se mueve en un círculo vertical de radio R con rapidez constante v. Suponiendo que el asiento permanece siempre vertical, deduzca expresiones para la fuerza que ejerce sobre el pasajero en el cenit y el nadir del círculo.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Tanto en el cenit como en el nadir del círculo, la incógnita es la magnitud n de la fuerza normal que el asiento ejerce sobre el pasajero. Obtendremos dicha fuerza en cada posición aplicando la segunda ley de Newton y las ecuaciones del movimiento circular uniforme.

PLANTEAR: El diagrama de la figura 5.37a muestra la velocidad y aceleración del pasajero en las dos posiciones. Observe que la aceleración está dirigida hacia abajo en el cenit del círculo y hacia arriba en el nadir. En ambas posiciones, las únicas fuerzas que actúan son



5.37 (a) El vector de aceleración del pasajero tiene la misma magnitud en el cenit y el nadir de la rueda de la fortuna, y en ambos casos apunta hacia el centro del círculo. (b) Diagrama de cuerpo libre del pasajero en el cenit del círculo. (c) Diagrama de cuerpo libre del pasajero en el nadir del círculo.

verticales: la fuerza normal hacia arriba y la fuerza de gravedad hacia abajo. Por tanto, sólo necesitamos la componente vertical de la segunda ley de Newton.

EJECUTAR: Las figuras 5.37b y 5.37c son los diagramas de cuerpo libre para las dos posiciones. Tomamos la dirección $+y$ hacia arriba en ambos casos. Sea n_C la fuerza normal hacia arriba que el asiento aplica al pasajero en el cenit, y n_N, en el nadir. En el cenit, la aceleración tiene magnitud v^2/R, pero su componente vertical es negativa porque su dirección es hacia abajo. Por tanto, $a_y = -v^2/R$ y la segunda ley de Newton nos dice que, en el cenit,

$$\text{Cenit: } \sum F_y = n_C + (-mg) = -m\frac{v^2}{R} \quad \text{o sea}$$

$$n_C = m\left(g - \frac{v^2}{R}\right)$$

En el nadir, la aceleración es hacia arriba, así que $a_y = +v^2/R$ y la segunda ley de Newton es

$$\text{Nadir: } \sum F_y = n_N + (-mg) = +m\frac{v^2}{R} \quad \text{o sea}$$

$$n_N = m\left(g + \frac{v^2}{R}\right)$$

EVALUAR: El resultado obtenido para n_C nos dice que, en el cenit de la rueda, la fuerza hacia arriba que el asiento aplica al pasajero es *menor* en magnitud que el peso de éste. Si la rueda gira con tal rapidez que $g - v^2/R = 0$, el asiento *no* aplica fuerza, y el pasajero está a punto de volar. Si v aumenta aún más, n_C se hará negativa, y se requerirá una fuerza *hacia abajo* (la de un cinturón, digamos) para mantener al pasajero en el asiento. En el nadir, en cambio, la fuerza normal n_N siempre es *mayor que* el peso del pasajero. Se siente que el asiento empuja más firmemente que en reposo.

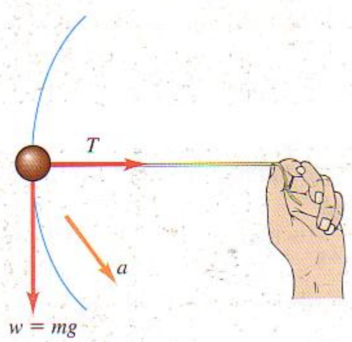
Reconocemos que n_C y n_N son los valores del *peso aparente* del pasajero en el cenit y el nadir del círculo. Como ejemplo específico, supongamos que la masa del pasajero es 60.0 kg, el radio del círculo es $R = 8.00$ m y la rueda efectúa una revolución en 10.0 s. Por las ecuaciones (5.14) y (5.16),

$$a_{rad} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \frac{4\pi^2(8.00\text{ m})}{(10.0\text{ s})^2} = 3.16\text{ m/s}^2$$

Los dos valores del peso aparente son

$$n_C = (60.0\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2 - 3.16\text{ m/s}^2) = 398\text{ N}$$
$$n_N = (60.0\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2 + 3.16\text{ m/s}^2) = 778\text{ N}$$

El peso del pasajero es 588 N, y n_C y n_N son aproximadamente 30% mayor y menor que el peso, respectivamente.



5.38 Pelota que se mueve en un círculo vertical. En un casi todos los puntos del círculo, hay una componente de la fuerza neta (y por tanto de la aceleración) tangente al círculo. La bola tiene movimiento circular no uniforme.

Si atamos un cordel a un objeto y lo hacemos girar en un círculo vertical, no podremos aplicar directamente el análisis del ejemplo 5.25 porque v *no* es constante; en todos los puntos del círculo excepto el cenit y el nadir, la fuerza neta (y por ende la aceleración) *no* apunta al centro del círculo (Fig. 5.38). Así, $\sum\vec{F}$ y $\vec{a}$ tienen una componente tangente al círculo y tenemos un caso de movimiento circular *no uniforme* (véase la sección 3.5). Es más, no podemos usar las fórmulas de aceleración constante para relacionar las velocidades en distintos puntos porque *ni* la magnitud *ni* la dirección de la aceleración son constantes. La mejor forma de obtener dichas relaciones es usando el concepto de energía. Consideraremos esto en el capítulo 7.

Evalúe su comprensión

La atracción gravitacional de nuestro planeta mantiene en órbita a los satélites. Un satélite en una órbita de radio pequeño se mueve con mayor rapidez que uno en una órbita amplia. Con base en esta información, explique la conclusión de que la atracción gravitacional de la Tierra disminuye al aumentar la distancia respecto al planeta.

*5.5 | Fuerzas fundamentales de la Naturaleza

Hemos visto fuerzas de varios tipos —peso, tensión, fricción, resistencia de fluidos y la fuerza normal— y veremos otras más al seguir estudiando física. Pero, ¿cuántas clases distintas de fuerzas hay? Actualmente, se cree que todas las fuerzas son expresiones de cuatro clases de fuerzas o interacciones *fundamentales* entre las partículas (Fig. 5.39). Dos de ellas las conocemos por la experiencia cotidiana; las otras dos implican interacciones entre partículas subatómicas que no podemos observar directamente con nuestros sentidos.

De las dos clases cotidianas, las **interacciones gravitacionales** fueron las primeras en estudiarse con detalle. El *peso* de un cuerpo se debe a la acción de la atracción gravitacional terrestre sobre él. La atracción gravitacional del Sol mantiene a la Tierra en su órbita casi circular en torno al Sol. Newton reconoció que tanto los movimientos de los planetas alrededor del Sol como la caída libre de objetos en la Tierra se deben a fuerzas gravitacionales. En el capítulo 12 estudiaremos las interacciones gravitacionales con mayor detalle y analizaremos su papel crucial en los movimientos de planetas y satélites.

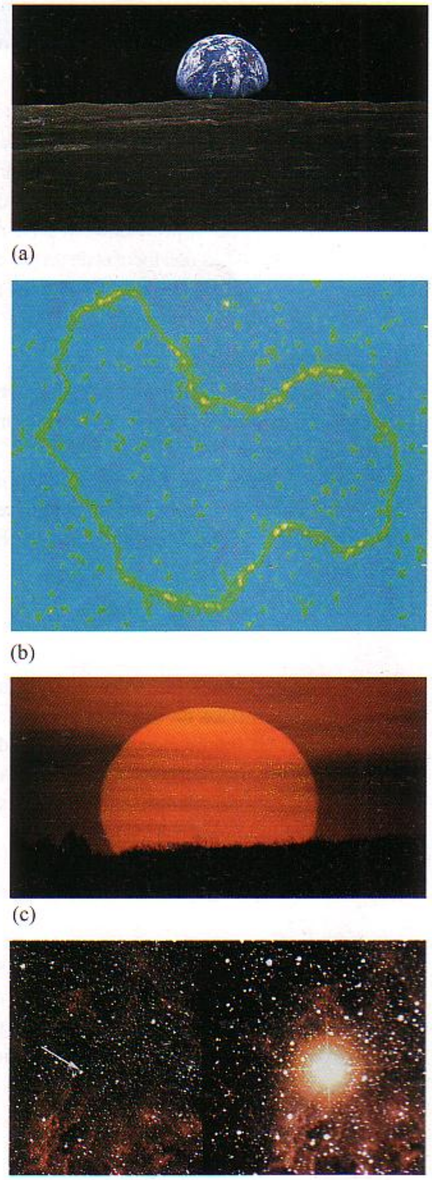
La otra clase cotidiana de fuerzas, la de las **interacciones electromagnéticas,** incluye las fuerzas eléctricas y magnéticas. Si pasamos un peine por el cabello, el peine atrae pedacitos de papel o de pelusa; esta interacción es resultado de una carga eléctrica en el peine. Todos los átomos contienen carga eléctrica positiva y negativa, así que átomos y moléculas pueden ejercer fuerzas eléctricas unos sobre otros. Las fuerzas de contacto, incluidas la normal, la de fricción y la de resistencia de fluidos, son la combinación de todas las fuerzas eléctricas y magnéticas ejercidas sobre los átomos de un cuerpo por los átomos de su entorno. Las fuerzas *magnéticas* se dan en interacciones entre imanes o entre un imán y un trozo de hierro. Podría parecer que éstas constituyen una categoría aparte, pero en realidad son causadas por cargas eléctricas en movimiento. En un electroimán, una corriente eléctrica en una bobina de alambre causa interacciones magnéticas. Estudiaremos las interacciones eléctricas y magnéticas con detalle en la segunda mitad del libro.

Estas dos interacciones difieren enormemente en intensidad. La repulsión eléctrica entre dos protones a cierta distancia es 10^{35} veces más fuerte que su atracción gravitacional. Las fuerzas gravitacionales no desempeñan un papel apreciable en la estructura atómica o molecular, pero en cuerpos de tamaño astronómico las cargas positivas y negativas suelen estar presentes en cantidades casi iguales, y las interacciones eléctricas resultantes casi se cancelan. Por ello, las interacciones gravitacionales son la influencia dominante en el movimiento de los planetas y la estructura interna de las estrellas.

Las otras dos clases de interacciones son menos conocidas. La **interacción fuerte** mantiene unido el núcleo de un átomo. Los núcleos contienen neutrones (eléctricamente neutros) y protones (con carga positiva). Los protones se repelen mutuamente, y el núcleo no sería estable si no hubiera una fuerza atractiva de otra clase para contrarrestar las interacciones eléctricas repulsivas. En este contexto, la interacción fuerte también se denomina *fuerza nuclear*; tiene un alcance mucho menor que las interacciones eléctricas, pero es mucho más fuerte dentro de ese alcance. Esta interacción también es la que causa la creación de partículas inestables en choques de partículas de alta energía.

Por último, tenemos la **interacción débil** que no desempeña un papel directo en el comportamiento de la materia ordinaria, pero es crucial en las interacciones de partículas fundamentales. Esta interacción causa una forma común de radioactividad, llamada desintegración beta, en la que un neutrón de un núcleo radioactivo se transforma en protón al tiempo que expulsa un electrón y una partícula casi sin masa llamada antineutrino. La interacción débil entre un antineutrino y la materia ordinaria es tan tenue que el antineutrino fácilmente podría atravesar una pared de plomo ¡de un millón de kilómetros de espesor!

Durante las últimas décadas se ha elaborado una teoría unificada de las interacciones electromagnética y débil. Ahora hablamos de la interacción *electrodébil* y, en cierto sentido, esto reduce el número de clases de interacciones de cuatro a tres. También se ha intentado entender las interacciones fuerte, electromagnética y débil dentro de una sola *gran teoría unificada* (GUT, por sus siglas en inglés), y se han dado los primeros pasos tentativos hacia una posible unificación de todas las interacciones en una *teoría de todo* (TOE, por sus siglas en inglés). Tales teorías aún son especulativas, y hay muchas preguntas sin respuesta en este campo de investigación tan activo.



(a) (b) (c) (d)

5.39 Ejemplos de las interacciones fundamentales en la naturaleza. (a) Las fuerzas gravitacionales causan el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra. (b) Las fuerzas electromagnéticas hacen que los átomos formen moléculas. Esta imagen de un microscopio de fuerza atómica muestra una molécula de ADN de plásmido bacterial. (c) Las fuerzas fuertes entre partículas nucleares causan las reacciones termonucleares en el centro del Sol; la energía liberada llega a nosotros como luz. (d) Las fuerzas débiles dentro de los núcleos atómicos desempeñan un papel crucial cuando una estrella (indicada por la flecha a la izquierda) hace explosión y se convierte en supernova (derecha).

RESUMEN

Cuando un cuerpo está en equilibrio en un marco de referencia inercial, la suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre él debe ser cero. Los diagramas de cuerpo libre son indispensables para identificar las fuerzas que actúan sobre el cuerpo considerado.

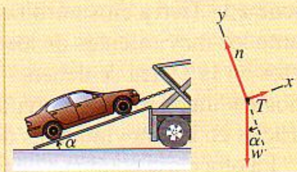
La tercera ley de Newton también suele necesitarse en problemas de equilibrio. Las dos fuerzas de un par acción-reacción *nunca* actúan sobre el mismo cuerpo. (Véanse los ejemplos 5.1 a 5.5.)

Forma vectorial:

$$\sum \vec{F} = \mathbf{0} \qquad (5.1)$$

Forma de componentes:

$$\sum F_x = 0$$
$$\sum F_y = 0 \qquad (5.2)$$



Si la suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo no es cero, el cuerpo tiene una aceleración determinada por la segunda ley de Newton.

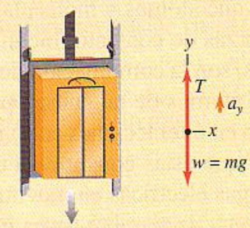
Al igual que en los problemas de equilibrio, los diagramas de cuerpo libre son indispensables para resolver problemas en los que interviene la segunda ley de Newton. (Véanse los ejemplos 5.6 a 5.13.)

Forma vectorial:

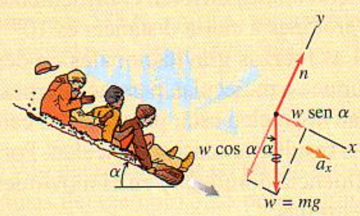
$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \qquad (5.3)$$

Forma de componentes:

$$\sum F_x = ma_x$$
$$\sum F_y = ma_y \qquad (5.4)$$



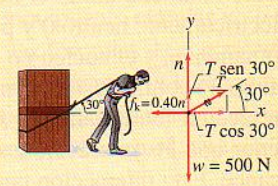
La fuerza de contacto entre dos cuerpos siempre puede representarse en términos de una fuerza normal $\vec{n}$ perpendicular a la superficie de interacción y una fuerza de fricción $\vec{f}$ paralela a la superficie. La fuerza normal ejercida por una superficie sobre un cuerpo *no* siempre es igual al peso del cuerpo. (Véanse los ejemplos 5.3, 5.10 y 5.11.)



Cuando un cuerpo se desliza sobre una superficie, la fuerza de fricción se denomina fricción cinética. Su magnitud f_k es aproximadamente proporcional a la magnitud de la fuerza normal n multiplicada por μ_k, el coeficiente de fricción cinética.

Magnitud de la fuerza de fricción cinética:

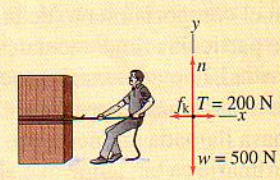
$$f_k = \mu_k n \qquad (5.5)$$

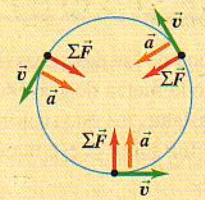


Si un cuerpo no se mueve relativo a la superficie, la fuerza de fricción se denomina fricción estática. La fuerza de fricción estática *máxima* posible es aproximadamente igual a la magnitud n fuerza normal multiplicada por μ_s, el coeficiente de fricción estática. La fuerza de fricción estática *real* puede variar entre cero y ese valor máximo, dependiendo de la situación. μ_s suele ser mayor que μ_k para un par de superficies dado. (Véanse los ejemplos 5.14 y 5.15.)

Magnitud de la fuerza de fricción estática:

$$f_s \leq \mu_s n \qquad (5.6)$$



En el movimiento circular uniforme, el vector aceleración apunta al centro del círculo. Al igual que en todos los problemas de dinámica, el movimiento se rige por la segunda ley de Newton $\sum\vec{F} = m\vec{a}$. (Véanse los ejemplos 5.21 a 5.25.)	Aceleración en movimiento circular uniforme: $$a_{rad} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} \quad (5.14), (5.16)$$	

Términos clave

arrastre del aire, 179
coeficiente de fricción cinética, 172
coeficiente de fricción de rodamiento, 178
coeficiente de fricción estática, 173
fuerza de fricción, 171
fuerza de fricción cinética, 172
fuerza de fricción estática, 172
fuerza resistiva en fluidos, 178
interacción débil, 189
interacción electromagnética, 189
interacción fuerte, 189
interacción gravitacional, 189
peso aparente, 166
rapidez terminal, 179

Notas del lector

Respuesta a la pregunta inicial del capítulo

Ninguna de las dos cosas: las fuerzas aerodinámicas siguen equilibrando la fuerza de gravedad. Aunque el ave asciende, su velocidad es constante, así que su aceleración es cero. Por tanto, la fuerza neta que actúa sobre el ave también debe ser cero.

Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

Sección 5.1 Los dos cables están dispuestos de forma simétrica, así que la tensión en cada uno tiene la misma magnitud T. La componente vertical de la tensión de cada cable es T sen 45° (o, lo que es lo mismo, T cos 45°), así que la primera ley de Newton aplicada a las fuerzas verticales nos dice que $2T \text{ sen } 45° - mg = 0$. Por tanto, $T = mg/(2 \text{ sen } 45°) = mg/\sqrt{2} = 0.71mg$.
Sección 5.2 La situación es la misma que en el ejemplo 5.11, pero con una fuerza adicional de magnitud desconocida F_{talones} que actúa en la dirección $-x$ (cuesta arriba). Por tanto, la ecuación de componente x de la segunda ley de Newton es $w \text{ sen } \alpha - F_{\text{talones}} = ma_x$, así que $F_{\text{talones}} = w \text{ sen } \alpha - ma_x$. Con $m = 90$ kg, $w = mg = (90 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)$, $\alpha = 3.0°$ y $a_x = -2.0 \text{ m/s}^2$ (la aceleración es cuesta arriba, opuesta al movimiento), obtenemos $F_{\text{talones}} = 2.3 \times 10^2$ N.
Sección 5.3 Esta situación es la misma que en el ejemplo 5.18. En ese ejemplo vimos que $a_x = g(\text{sen } \alpha - \mu_k \cos \alpha)$; al despejar μ_k, obtenemos $\mu_k = (g \text{ sen } \alpha - a_x)/(g \cos \alpha) = [(9.8 \text{ m/s}^2) \text{ sen } 3.0° - (0.25 \text{ m/s}^2)]/[(9.8 \text{ m/s}^2) \cos 3.0°] = 0.27$.
Sección 5.4 Un satélite con masa m que da vuelta a la Tierra con rapidez v en una órbita de radio r tiene una aceleración de magnitud v^2/r, así que la fuerza neta de la gravedad terrestre que actúa sobre él tiene magnitud $F = mv^2/r$. Cuanto más lejos está el satélite de la Tierra, mayor es el valor de r, menor es el valor de v y menores son los valores de v^2/r y de F. Dicho de otro modo, la fuerza gravitacional de la Tierra disminuye al aumentar la distancia.

Preguntas para análisis

P5.1 Un hombre se sienta en una silla suspendida de una cuerda que pasa por una polea suspendida del techo, y el hombre sujeta el otro extremo de la cuerda. ¿Qué tensión hay en la cuerda y qué fuerza ejerce la silla sobre el hombre? Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el hombre.
P5.2 "En general, la fuerza normal no es igual al peso". Dé un ejemplo en que ambas fuerzas tengan la misma magnitud y al menos dos en que no sea así.
P5.3 Se tiende un cordón entre dos palos. Por más que se estira el cordón, siempre cuelga un poco en el centro. Explique por qué.
P5.4 Se conduce un auto cuesta arriba con rapidez constante. Analice las fuerzas que actúan sobre el auto. ¿Qué lo empuja cuesta arriba?
P5.5 Por razones médicas, es importante que los astronautas en el espacio exterior determinen su masa corporal a intervalos regulares. Invente una forma de medir la masa en un entorno de aparente ingravidez.
P5.6 Al empujar una caja rampa arriba, ¿se requiere menos fuerza si se empuja horizontalmente o paralelo a la rampa? ¿Por qué?
P5.7 Una mujer en un elevador suelta su maletín pero éste no cae al piso. ¿Cómo se está moviendo el elevador?
P5.8 Las básculas pueden dividirse en las que usan resortes y las que usan masas estándar para equilibrar masas desconocidas. ¿Cuál grupo sería más exacto en un elevador en aceleración? ¿Y en la Luna? ¿Importa si estamos tratando de determinar masa o peso?
P5.9 Al apretar una tuerca en un perno, ¿cómo aumentamos la fuerza de fricción? ¿Cómo funciona una rondana de presión?
P5.10 Un bloque descansa sobre un plano inclinado con suficiente fricción para que no resbale. Para mover el bloque, ¿es más fácil empujarlo plano arriba, plano abajo o de lado? ¿Por qué?
P5.11 Una caja con libros descansa en un piso horizontal. Para deslizarla sobre el piso con velocidad constante, ¿por qué se ejerce una fuerza menor si se tira de ella con un ángulo θ sobre la horizontal que si se empuja con el mismo ángulo bajo la horizontal?
P5.12 Para detener un auto en un camino congelado, ¿es mejor pisar el freno hasta "bloquear" las ruedas y hacer que desliceen o pisarlo suavemente de modo que las ruedas sigan girando? ¿Por qué?
P5.13 La fuerza de fricción cinética, al actuar sobre un objeto, ¿puede en algún caso hacer que *aumente* la rapidez del objeto? Si no es así, explique por qué no. Si es afirmativo, dé al menos un ejemplo. Repita para la fuerza de fricción estática.
P5.14 Al pararnos descalzos en una tina húmeda, nos sentimos firmes, pero es muy posible que resbalemos peligrosamente. Analice la situación en términos de los dos coeficientes de fricción.
P5.15 Imagine que empuja una caja grande desde la parte trasera de un elevador de carga hacia el frente, mientras el elevador viaja al siguiente piso. ¿En qué situación la fuerza que debe aplicar para mover la caja es mínima y en qué situación es máxima: cuando el elevador está acelerando hacia arriba, cuando está acelerando hacia abajo o cuando viaja con rapidez constante? Explique.
P5.16 La carretera Roller Coaster cerca de Tucson, Arizona, se llama así porque parece una montaña rusa. Si conducimos en ella con rapidez constante, ¿dónde es máxima y mínima la fuerza normal? ¿Por qué sería una pésima decisión de diseño de carreteras poner una curva no peraltada en la cima de una de estas colinas?
P5.17 Una revista de automóviles llama a las curvas de radio decreciente "la maldición del conductor dominguero". Explique por qué.
P5.18 Si Ud. cuelga unos dados de peluche en el espejo retrovisor y toma una curva peraltada, ¿cómo puede saber si está viajando con una rapidez mayor, igual o menor que la usada para calcular el ángulo de peralte?
P5.19 Si hay una fuerza neta sobre una partícula en movimiento circular uniforme, ¿por qué no cambia la rapidez de la partícula?
P5.20 Una curva de un camino tiene un peralte calculado para 80 km/h. Sin embargo, el camino tiene hielo, y Ud. piensa tomar el carril más alto a sólo 20 km/h. ¿Qué puede sucederle a su auto? ¿Por qué?
P5.21 Si hacemos girar una bola en el extremo de un hilo ligero en un círculo horizontal con rapidez constante, el hilo nunca está exactamente sobre el vector radio desde el centro de la trayectoria hacia la bola. ¿El hilo está arriba o abajo de la horizontal? En relación con la dirección en que se mueve la bola, ¿el hilo está adelante o atrás del vector radio? Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la

bola y úselo para explicar sus respuestas. (La resistencia del aire puede ser un factor.)

P5.22 No se incluyó la fuerza centrífuga en los diagramas de cuerpo libre de las figuras 5.34b y 5.35b. Explique por qué.

P5.23 Un profesor gira un tapón de hule en un círculo horizontal en el extremo de un hilo y le dice a Carolina, sentada en la primera fila del aula, que soltará el hilo cuando el tapón esté directamente frente al rostro de ella. ¿Debe preocuparse Carolina?

P5.24 Para que las fuerzas sobre los pasajeros no sean excesivas, los juegos de feria que describen un lazo vertical se diseñan de modo que el lazo, en vez de ser un círculo perfecto, tenga un radio de curvatura mayor abajo que arriba. Explique.

P5.25 Se deja caer una pelota de tenis desde la parte superior de un cilindro alto de vidrio, primero con el cilindro evacuado de modo que no haya resistencia del aire y luego con el cilindro lleno de aire. Se toman fotografías con destello múltiple (como la Fig. 2.21) de las dos caídas. Por las fotos, ¿cómo puede Ud. saber cuál es cuál? ¿O es imposible?

P5.26 Si lanza una pelota de béisbol verticalmente hacia arriba con rapidez v_0, ¿cómo será su rapidez, cuando regrese al punto de lanzamiento, en comparación con v_0 a) en ausencia de resistencia del aire? b) ¿En presencia de resistencia del aire? Explique.

P5.27 Imagine que toma dos pelotas de tenis idénticas y llena una de agua. Deja caer las dos pelotas simultáneamente desde la azotea de un edificio alto. Si la resistencia del aire es insignificante, ¿cuál pelota llegará primero a la acera? Explique. ¿Y si la resistencia del aire *no es* insignificante?

P5.28 Una hoja de papel cae en aire con rapidez terminal. Una hoja idéntica se aprieta bien para darle forma de bola y se deja caer desde una altura considerable. ¿Cuál hoja, la plana o la hecha bola, cae con mayor rapidez terminal? Explique. Compare la fuerza de resistencia del aire sobre la hoja plana con la fuerza resistiva del aire sobre la hoja hecha bola cuando ambas caen con su rapidez terminal. Explique.

P5.29 Se lanza una pelota verticalmente hacia arriba. Si *no* se hace caso omiso de la resistencia del aire, compare el tiempo que tarda la bola en alcanzar su altura máxima con el que tarda en volver al punto de lanzamiento. Explique su respuesta.

P5.30 ¿Cuándo puede una pelota de béisbol en vuelo tener una aceleración con una componente positiva hacia arriba? Explique en términos de las fuerzas sobre la bola y también de las componentes de velocidad comparadas con la rapidez terminal. *No* desprecie la resistencia del aire.

P5.31 Cuando una pelota bateada se mueve con arrastre del aire, ¿tarda más en alcanzar su altura máxima o en descender de esa altura al suelo? ¿O es igual el tiempo? Explique en términos de las fuerzas que actúan sobre la bola.

P5.32 Cuando una pelota bateada se mueve con arrastre del aire, ¿recorre una distancia horizontal mayor mientras sube a su altura máxima o mientras baja al suelo? ¿O es igual la distancia horizontal en ambas partes de la trayectoria? Explique en términos de las fuerzas que actúan sobre la bola.

P5.33 "Se lanza una pelota del borde de un risco alto. Sea cual sea el ángulo con que se lance, la resistencia del aire hará que llegue un momento en que la pelota caiga verticalmente." Justifique esta afirmación.

Ejercicios

Sección 5.1 Empleo de la primera ley de Newton: partículas en equilibrio

5.1 Dos pesos de 25.0 N cuelgan de extremos opuestos de una cuerda que pasa por una polea ligera sin fricción sujeta a una cadena fijada en el techo. a) ¿Qué tensión hay en la cuerda? b) ¿Y en la cadena?

5.2 En la figura 5.40, los bloques suspendidos de la cuerda ambos tienen peso w. Las poleas no tienen fricción y el peso de las cuerdas es despreciable. Calcule en cada caso la tensión T en la cuerda en términos de w. En cada caso, incluya el o los diagramas de cuerpo libres que usó para obtener la respuesta.

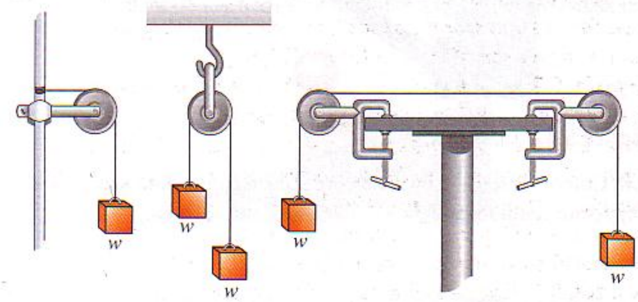


Figura 5.40 Ejercicio 5.2.

5.3 Un arqueólogo audaz cruza de un risco a otro colgado de una cuerda estirada entre los riscos. Se detiene a la mitad para descansar (Fig. 5.41). La cuerda se rompe si su tensión excede 2.50×10^4 N, y la masa de nuestro héroe es de 90.0 kg. a) Si el ángulo θ es 10.0°, calcule la tensión en la cuerda. b) ¿Qué valor mínimo puede tener θ sin que se rompa la cuerda?

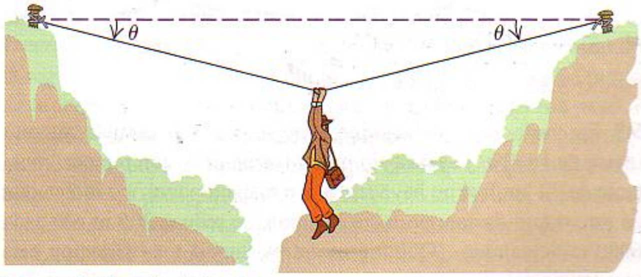


Figura 5.41 Ejercicio 5.3.

5.4 Un cuadro colgado en una pared pende de dos alambres sujetos a sus esquinas superiores. Si los alambres forman el mismo ángulo con la vertical, ¿cuánto medirá el ángulo si la tensión en los alambres es igual a 0.75 del peso del cuadro? (Haga caso omiso de la fricción entre la pared y el cuadro.)

5.5 Resuelva el problema del ejemplo 5.4 tomando el eje y vertical y el x horizontal. ¿Obtiene las mismas respuestas?

5.6 En San Francisco hay calles que forman un ángulo de 17.5° con la horizontal. ¿Qué fuerza paralela a la calle se requiere para impedir que un Corvette 1967 con masa de 1390 kg ruede cuesta abajo en una calle así?

5.7 Una gran bola de demolición está sujeta por dos cables de acero ligeros (Fig. 5.42). Si su masa es de 4090 kg, calcule a) la tensión T_B en el cable que forma un ángulo de 40° con la vertical. b) La tensión T_A en el cable horizontal.

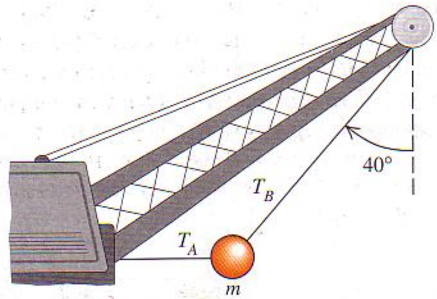


Figura 5.42 Ejercicio 5.7.

5.8 Calcule la tensión en cada cordel de la figura 5.43 si el peso del objeto suspendido es w.

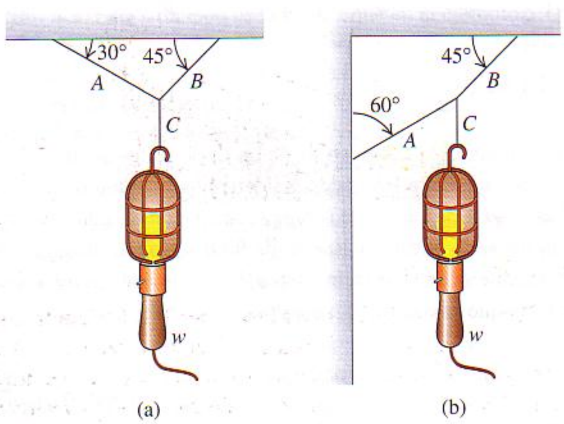


Figura 5.43 Ejercicio 5.8.

5.9 En cierto punto del camino entre su casa y la escuela, su auto (masa de 1600 kg) avanza sin motor (en neutral) con rapidez constante de 72 km/h si no hay viento. Un mapa topográfico indica que en este tramo de camino recto la altitud se reduce 200 m por cada 6000 m de camino. ¿Qué fuerza de resistencia total (fricción más resistencia del aire) actúa sobre su coche cuando viaja a 72 km/h?

5.10 Un hombre empuja un piano de 180 kg para que baje deslizándose con velocidad constante por una rampa inclinada 11.0° sobre la horizontal. Haga caso omiso de la fricción que actúa sobre el piano. Si la fuerza aplicada es paralela a la rampa, calcule su magnitud.

5.11 En la figura 5.44 el peso w es de 60.0 N. a) Calcule la tensión en el hilo diagonal. b) Calcule la magnitud de las fuerzas horizontales $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ que deben aplicarse para mantener el sistema en la posición indicada.

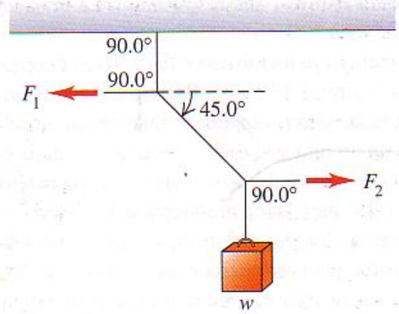


Figura 5.44 Ejercicio 5.11.

5.12 Un balón descansa contra el poste al que está atado (Fig. 5.45). Si el cordel mide 1.40 m, el balón tiene 0.110 m de radio y una masa de 0.270 kg, ¿qué tensión hay en la cuerda y qué fuerza ejerce el poste sobre el balón. Suponga que no hay fricción entre el poste y el balón. (El cordel está atado al balón de modo que una línea a lo largo del cordel pasa por el centro del balón.)

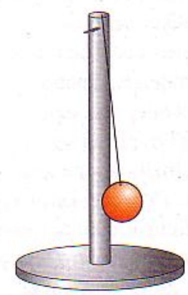


Figura 5.45 Ejercicio 5.12

5.13 Dos bloques, ambos con peso w, están sostenidos en un plano inclinado sin fricción (Fig. 5.46). En términos de w y del ángulo α, calcule la tensión en a) la cuerda que conecta los bloques; b) la cuerda que conecta el bloque A a la pared. c) Calcule la magnitud de la fuerza que el plano inclinado ejerce sobre cada bloque. d) Interprete sus respuestas para los casos $\alpha = 0$ y $\alpha = 90°$.

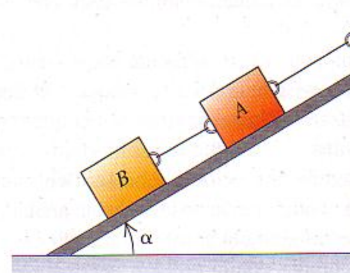


Figura 5.46 Ejercicio 5.13.

5.14 Un avión vuela horizontalmente con rapidez constante. Cuatro fuerzas actúan sobre él: su peso $w = mg$; una fuerza hacia adelante F provista por el motor (el *empuje*); la resistencia del aire o *arrastre* f, que actúa en dirección opuesta al vuelo; y una fuerza ascendente de sustentación L provista por las alas, que actúa perpendicular al plano de las alas y a la dirección de vuelo. La fuerza f es proporcional al cuadrado de la rapidez. a) Demuestre que $F = f$ y $L = w$. b) Suponga que el piloto empuja la palanca de mando para duplicar el valor de F, manteniendo una altitud constante. En algún momento, el avión alcanzará una nueva rapidez constante, mayor que la anterior. Compare el nuevo valor de f con el anterior. c) ¿Qué tanto mayor que la original es ahora la rapidez del avión?

Sección 5.2 Empleo de la segunda ley de Newton: dinámica de partículas

5.15 Máquina de Atwood. Una carga de 15.0 kg de tabiques pende de una cuerda que pasa por una polea pequeña sin fricción y tiene un contrapeso de 28.0 kg en el otro extremo (Fig. 5.47). El sistema se libera del reposo. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la carga y otro para el contrapeso. b) ¿Qué magnitud tiene la aceleración hacia arriba de la carga de tabiques? c) ¿Qué tensión hay en la cuerda mientras la carga se mueve? Compare esa tensión con el peso de la carga y con el del contrapeso.

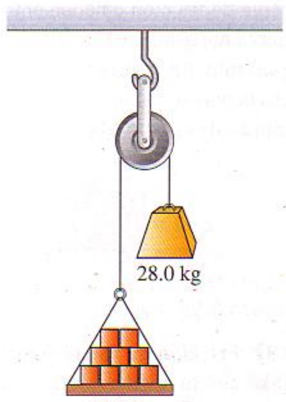


Figura 5.47 Ejercicio 5.15.

5.16 ~~Un~~ bloque de hielo de 8.00 kg, liberado del reposo en la parte superior de una rampa sin fricción de 1.50 m de longitud, alcanza una rapidez de 2.50 m/s en la base de la rampa. ¿Qué ángulo forma la rampa con la horizontal?

5.17 Una cuerda ligera está atada a un bloque de 4.00 kg que descansa en una superficie horizontal sin fricción. La cuerda horizontal pasa por una polea sin masa ni fricción, y un bloque de masa m pende del otro extremo. Al soltarse los bloques, la tensión en la cuerda es de 10.0 N. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el bloque de 4.00 kg y otro para el de masa m. Calcule b) la aceleración de cada bloque y c) la masa m del bloque colgante. d) Compare la tensión con el peso del bloque colgante.

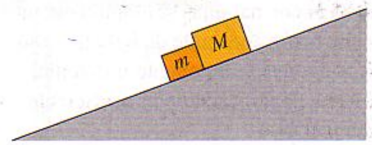
5.18 Diseño de pistas. Un avión de carga despega de un campo horizontal remolcando dos planeadores de 700 kg cada uno, en fila. Podemos suponer que la resistencia total (arrastre más fricción con la pista) que actúa sobre cada uno es constante e igual a 2500 N. La tensión en la cuerda entre el avión y el primer planeador no debe exceder de 12,000 N. a) Si se requiere una rapidez de 40 m/s para despegar, ¿qué longitud mínima debe tener la pista? b) ¿Qué tensión hay en la cuerda entre los dos planeadores durante la aceleración para el despegue?

5.19 Un estudiante de física 550 N se para en una báscula dentro de un elevador. Al comenzar a moverse el elevador, la báscula marca 450 N. a) Determine la aceleración del elevador (magnitud y dirección). b) Repita con una lectura de 670 N. c) Si la lectura es 0, ¿debe preocuparse el joven? Explique.

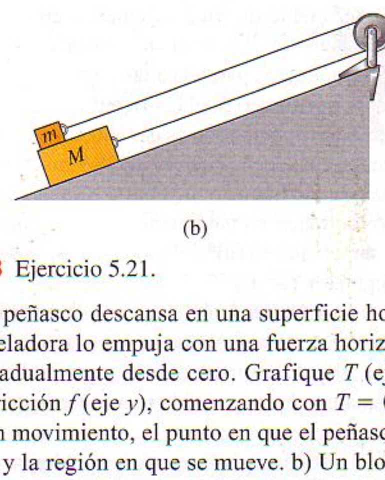
5.20 Una estudiante de física que juega con una mesa de hockey de aire (sin fricción) observa que, si imparte al disco una velocidad de 3.80 m/s a lo largo de la mesa, de 1.75 m, al llegar el disco al otro lado se ha desviado 2.50 cm a la derecha pero aún tiene una componente de velocidad longitudinal de 3.80 m/s. Ella concluye, atinadamente, que la mesa no está nivelada y calcula correctamente su inclinación a partir de la información mencionada. ¿Cuál es el ángulo de inclinación?

Sección 5.3 Fuerzas de fricción

5.21 Diagramas de cuerpo libre. Los primeros dos pasos para resolver problemas de la segunda ley de Newton son escoger un objeto para su análisis y dibujar diagramas de cuerpo libre para él. Haga esto en cada una de estas situaciones: a) una masa M se desliza hacia abajo por un plano inclinado sin fricción con ángulo α; b) una masa M se desliza hacia arriba por un plano inclinado sin fricción con ángulo α; c) como en (b) pero con fricción cinética; d) dos masas M y m bajan por un plano inclinado de ángulo α con fricción, como en la figura 5.48a. En este caso, dibuje los diagramas de cuerpo libre para M y para m. Identifique las fuerzas que son pares acción-reacción. e) Dibuje diagramas de cuerpo libre para las masas m y M de la figura 5.48b. Identifique los pares acción-reacción. Hay fricción entre todas las superficies en contacto. La polea no tiene fricción ni masa. Asegúrese de indicar siempre la dirección correcta de las fuerzas y de entender qué objeto causa cada fuerza del diagrama.



(a)



(b)

Figura 5.48 Ejercicio 5.21.

5.22 a) Un peñasco descansa en una superficie horizontal áspera. Una niveladora lo empuja con una fuerza horizontal T que se aumenta gradualmente desde cero. Grafique T (eje x) contra la fuerza de fricción f (eje y), comenzando con $T = 0$ y mostrando la región sin movimiento, el punto en que el peñasco está a punto de moverse y la región en que se mueve. b) Un bloque de peso w descansa en una tabla horizontal áspera. Se aumenta gradualmente el ángulo θ de la tabla hasta que el bloque comienza a resbalar. Dibuje dos gráficas con θ en el eje x. En una, muestre el cociente de la fuerza normal y el peso, n/w, en función de θ. En la otra, muestre el cociente de la fuerza de fricción y el peso, f/w. Indique la región sin movimiento, de movimiento inminente y de movimiento.

5.23 Un trabajador de bodega empuja una caja de 11.20 kg en una superficie horizontal con rapidez constante de 3.50 m/s. El coeficiente de fricción cinética entre la caja y la superficie es de 0.20. a) ¿Qué fuerza horizontal debe aplicar el trabajador para mantener el movimiento? b) Si se elimina esa fuerza, ¿qué distancia se desliza la caja antes de parar?

5.24 Una caja de bananas que pesa 40.0 N descansa en una superficie horizontal. El coeficiente de fricción estática entre la caja y la superficie es de 0.40, y el de fricción cinética, de 0.20. a) Si no se aplica ninguna fuerza horizontal a la caja en reposo, ¿qué tan grande es la fuerza de fricción ejercida sobre la caja? b) ¿Qué magnitud tiene la fuerza de fricción si un mono aplica una fuerza horizontal de 6.0 N a la caja en reposo? c) ¿Qué fuerza horizontal mínima debe aplicar el mono para poner en movimiento la caja? d) ¿Y para que siga moviéndose con velocidad constante una vez que ha comenzado a moverse? e) Si el mono aplica una fuerza horizontal de 18.0 N, ¿qué magnitud tiene la fuerza de fricción y qué aceleración tiene la caja?

5.25 En un experimento de laboratorio de física, una caja de 6.00 kg es empujada en una mesa plana por una fuerza horizontal $\vec{F}$. a) Si la caja se mueve a 0.350 m/s (constante) y el coeficiente de fricción cinética es de 0.12, ¿qué magnitud tiene $\vec{F}$? b) ¿Cuál es la magnitud de $\vec{F}$ si la caja tiene una aceleración constante de 0.180 m/s^2? c) ¿Cómo cambiarían sus respuestas a las partes (a) y (b) si el experimento se realizara en la Luna (donde $g = 1.62$ m/s^2)?

5.26 Una caja de 85 N con naranjas se empuja por un piso horizontal, frenándose a una razón constante de 0.90 m/s cada segundo. La fuerza de empuje tiene una componente horizontal de 20 N y una vertical de 25 N hacia abajo. Calcule el coeficiente de fricción cinética entre la caja y el piso.

5.27 Una caja fuerte de 260 kg se debe bajar con rapidez constante sobre guías de 20.0 m de longitud desde un camión de 2.00 m de altura. a) Si el coeficiente de fricción cinética entre la caja y las guías es de 0.25, ¿hay que tirar de la caja hacia abajo o empujarla hacia arriba? b) ¿Qué fuerza paralela a las guías se necesita?

5.28 Distancia de parada. a) Si el coeficiente de fricción cinética entre neumáticos y pavimento seco es de 0.80, en qué distancia mínima puede detenerse un coche que viaja a 28.7 m/s bloqueando los frenos? b) En pavimento húmedo, μ_k podría bajar a 0.25. ¿Con qué rapidez debemos conducir en pavimento húmedo para poder parar en la misma distancia que en (a)? (*Nota:* Bloquear los frenos *no* es la forma más segura de parar.)

5.29 Coeficiente de fricción. Una rondana de latón limpia se desliza por una superficie de acero horizontal limpia hasta parar. Usando los valores de la tabla 5.1, ¿qué tanto más lejos habría llegado la pieza con la misma rapidez inicial si la rondana estuviera recubierta con teflón?

5.30 Considere el sistema de la figura 5.49. El bloque A tiene peso w_A, y el B, w_B. Una vez que el bloque B se pone en movimiento hacia abajo, desciende con rapidez constante. a) Calcule el coeficiente de fricción cinética entre el bloque A y la superficie de la mesa. b) Un gato, que también pesa w_A, se queda dormido sobre el bloque A. Si ahora se pone en movimiento hacia abajo el bloque B, ¿qué aceleración (magnitud y dirección) tendrá?

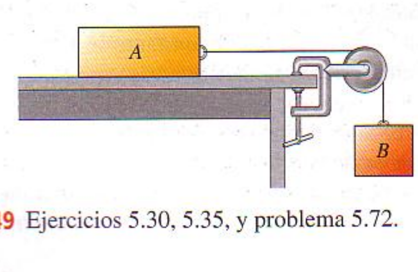


Figura 5.49 Ejercicios 5.30, 5.35, y problema 5.72.

5.31 Dos cajas conectadas por una cuerda están en una superficie horizontal (Fig. 5.50). La caja A tiene masa m_A; la B, m_B. El coeficiente de fricción cinética entre las cajas y la superficie es μ_k. Una fuerza horizontal $\vec{F}$ tira de las cajas hacia la derecha con velocidad constante. En términos de m_A, m_B y μ_k, calcule a) la magnitud de $\vec{F}$ y b) la tensión en la cuerda que une los bloques. Incluya el o los diagramas de cuerpo libre que usó para obtener cada respuesta.

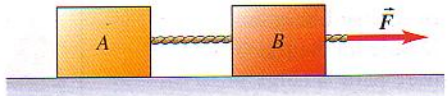


Figura 5.50 Ejercicio 5.31.

5.32 Fricción de rodamiento. Dos ruedas de bicicleta se ponen a rodar con la misma rapidez inicial de 3.50 m/s en un camino largo y recto, y se mide la distancia que viaja cada una antes de que su rapidez se reduzca a la mitad. Una rueda se infló a 40 psi y avanzó 18.1 m; la otra tiene 105 psi y avanzó 92.9 m. ¿Cuánto vale el coeficiente de fricción rodante μ_r para cada una? Suponga que la fuerza horizontal neta sólo se debe a la fricción de rodamiento.

5.33 Ruedas. Suponga que determina que se requiere una fuerza horizontal de 160 N para deslizar una caja con rapidez constante por la superficie de un piso nivelado. El coeficiente de fricción estática es de 0.52 y el coeficiente de fricción cinética es de 0.47. Si coloca la caja en una plataforma rodante con masa de 5.3 kg y coeficiente de fricción rodante de 0.018, ¿qué aceleración horizontal imprimirá esa fuerza de 160 N?

5.34 Suponga que determina que se requiere una fuerza horizontal de 200 N para mover una camioneta vacía por un camino horizontal con una rapidez de 2.4 m/s. Después, carga la camioneta e infla más los neumáticos de modo que su peso total aumente en un 42% y su coeficiente de fricción rodante disminuya en un 19%. ¿Qué fuerza horizontal necesitará ahora para mover la camioneta por el mismo camino con la misma rapidez? La rapidez es lo bastante baja como para hacer caso omiso de la resistencia del aire.

5.35 Como se muestra en la figura 5.49, el bloque A (masa 2.25 kg) descansa sobre una mesa y está conectado mediante un cordón horizontal que pasa por una polea ligera sin fricción a un bloque colgante B (masa 1.30 kg). El coeficiente de fricción cinética entre el bloque A y la superficie es de 0.550. Los bloques se sueltan del reposo. Calcule a) la rapidez de cada bloque después de moverse 3.00 cm y b) la tensión en el cordón. Incluya el o los diagramas de cuerpo libre que usó para obtener las respuestas.

5.36 Una caja de 25.0 kg con libros de texto está en una rampa de carga que forma un ángulo α con la horizontal. El coeficiente de fricción cinética es de 0.25, y el de fricción estática, 0.35. a) Al aumentar α, determine el ángulo mínimo con que la caja comienza a resbalar. Con este ángulo, b) calcule la aceleración una vez que la caja está en movimiento y c) la rapidez con que se moverá la caja una vez que haya resbalado 5.0 m por la rampa.

5.37 Una caja grande de masa m descansa en un piso horizontal. Los coeficientes de fricción entre la caja y el piso son μ_s y μ_k. Una mujer empuja la caja con fuerza $\vec{F}$ y un ángulo θ bajo la horizontal. a) ¿Qué magnitud debe tener $\vec{F}$ para que la caja se mueva con velocidad constante? b) Si μ_s es mayor que cierto valor crítico, la mujer no podrá poner en movimiento la caja por más fuerte que empuje. Calcule dicho valor crítico.

5.38 Una caja de masa m se arrastra por un piso horizontal cuyo coeficiente de fricción cinética es μ_k, mediante una cuerda de la que se tira con una fuerza de magnitud F y ángulo θ sobre la horizontal. a) Obtenga una expresión en términos de m, μ_k, θ y g para la magnitud de la fuerza necesaria para mover la caja con rapidez constante. b) Un instructor de primeros auxilios, que sabe que usted estudia física, le pide averiguar qué fuerza necesitaría para deslizar con rapidez constante un paciente de 90 kg por un piso, tirando de él con un ángulo de 25° sobre la horizontal. Arrastrando con una balanza de resorte unos pesos envueltos en ropa vieja, Ud. determina que $\mu_k = 0.35$. Utilice el resultado de (a) para contestar la pregunta del instructor.

5.39 Los bloques A, B y C se colocan como en la figura 5.51 y se conectan con cuerdas de masa despreciable. Tanto A como B pesan 25.0 N cada uno, y el coeficiente de fricción cinética entre cada bloque y la superficie es de 0.35. El bloque C desciende con velocidad constante. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre que muestre las fuerzas que actúan sobre A, y otro para B. b) Calcule la tensión en la cuerda que une los bloques A y B. c) ¿Cuánto pesa el bloque C? d) Si se cortara la cuerda que une A y B, ¿qué aceleración tendría C?

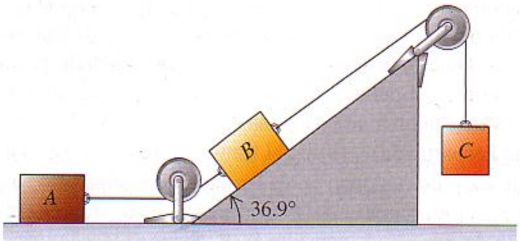


Figura 5.51 Ejercicio 5.39.

5.40 Deduzca las ecuaciones (5.11) y (5.12) a partir de la ecuación (5.10).

5.41 a) En el ejemplo 5.20, ¿qué valor de D se requiere para que $v_t = 42$ m/s para el paracaidista? b) Si la hija del paracaidista, de masa 45 kg, cae en aire y tiene la misma D (0.25 kg/m) que su padre, ¿cuál es su velocidad terminal?

5.42 Se lanza una pelota verticalmentre hacia arriba. La fuerza de arrastre es proporcional a v^2. En términos de g, ¿cuál es la componente y de aceleración que tiene la pelota cuando su rapidez es la mitad de la rapidez terminal a) mientras sube? b) ¿Al bajar?

Sección 5.4 Dinámica del movimiento circular

5.43 Una piedra de 0.80 kg se ata a un cordel de 0.90 m. El cordel se rompe si su tensión excede 600 N. (Ésta es la *resistencia de ruptura* del cordel.) La piedra se gira en un círculo horizontal sobre una mesa sin fricción; el otro extremo del cordel está fijo. Calcule la rapidez máxima que puede alcanzar la piedra sin romper el cordel.

5.44 Una curva plana (sin peralte) de una autopista tiene 220 m de radio. Un auto la toma a 25.0 m/s. ¿Qué coeficiente de fricción mínimo impide el deslizamiento?

5.45 Los aviones experimentan una fuerza de sustentación (debida al aire) perpendiular al plano de las alas y a la dirección del vuelo. Los aviones ligeros se diseñan de modo que sus alas produzcan una fuerza de sustentación segura de 3.8 veces el peso del avión. Una fuerza mayor podría dañar la estructura del ala. (Los aviones para acrobacias y de combate se diseñan con límites mucho mayores.) a) ¿Qué ángulo de ladeo máximo puede mantener el piloto en un giro a altura constante sin poner en peligro el avión (y su propia seguridad? b) ¿Su respuesta a la parte (a) depende de la rapidez del avión? Explique.

5.46 El "columpio gigante" de una feria consiste en un eje vertical central con varios brazos horizontales en su extremo superior (Fig. 5.52). Cada brazo sostiene un asiento suspendido de un cable de 5.00 m sujeto al brazo en un punto a 3.00 m del eje central. a) Calcule el tiempo de una revolución del columpio si el cable forma un ángulo de 30.0° con la vertical. b) ¿El ángulo depende del peso del pasajero para una rapidez de giro dada?

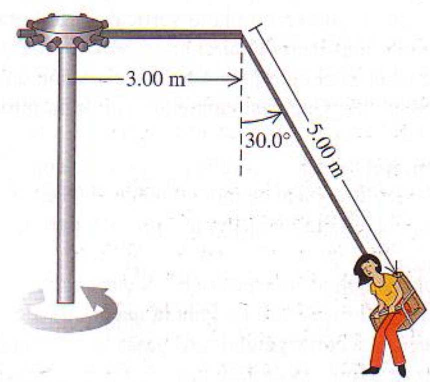


Figura 5.52 Ejercicio 5.46.

5.47 Los aviones experimentan una fuerza de sustentación (debida al aire) perpendicular al plano de las alas y a la dirección del vuelo. Un avión pequeño vuela a 240 km/h (constante). ¿A qué ángulo con la horizontal deben inclinarse las alas para ejecutar un giro horizontal del este al norte con radio de giro de 1200 m?

5.48 Un botón pequeño colocado en una plataforma giratoria horizontal de 0.320 m de diámetro gira junto con la plataforma cuando ésta gira a 40.0 rpm, siempre que el botón no esté a más de 0.150 m del eje. a) ¿Qué coeficiente de fricción estática hay entre el botón y la plataforma? b) ¿A qué distancia del eje puede estar el botón, sin resbalar, si la plataforma gira a 60.0 rpm?

5.49 **Estaciones espaciales giratorias**. Uno de los problemas de vivir en el espacio exterior es la aparente falta de peso. Una solución es diseñar estaciones espaciales que giran sobre su centro con rapidez constante, creando "gravedad artificial" en el borde exterior de la estación. a) Si el diámetro de la estación es de 800 m, ¿cuántas revoluciones por minuto se necesitan para que la aceleración de la "gravedad artificial" sea de 9.8 m/s^2? b) Si la estación es un área de espera para pasajeros que van a Marte, podría ser deseable simular la aceleración debida a la gravedad en la superficie marciana (3.70 m/s^2). ¿Cuántas revoluciones por minuto se necesitan en este caso?

5.50 La rueda de la fortuna Cosmoclock 21 de Yokohama, Japón, tiene 100 m de diámetro. Su nombre proviene de sus 60 brazos, cada uno de los cuales puede funcionar como segundero (dando una vuelta cada 60.0 s). a) Determine la rapidez de los pasajeros con esta rotación. b) Un pasajero pesa 882 N en la caseta de "adivine el peso" en tierra. ¿Qué peso aparente tiene en el punto más alto y el más bajo de la rueda? c) ¿Cuánto tardaría una revolución si el peso aparente del pasajero en el punto más alto fuera cero? d) ¿Cuál sería entonces su peso aparente en el punto más bajo?

5.51 Un avión describe un rizo (un camino circular en un plano vertical) de 150 m de radio. La cabeza del piloto apunta siempre al centro del rizo. La rapidez del avión no es constante; es mínima en el cenit del rizo y máxima en el nadir. a) En el cenit, el piloto experimenta ingravidez. ¿Qué rapidez tiene el avión en este punto? b) En el nadir, la rapidez del avión es de 280 km/h. ¿Qué peso aparente tiene el piloto aquí? Su peso real es de 700 N.

5.52 Una piloto de 50.0 kg en picada vertical sale de ella cambiando su curso a un círculo en un plano vertical. a) Si la rapidez del avión en el punto más bajo del círculo es de 95.0 m/s, ¿qué radio mínimo debe tener el círculo para que la aceleración en ese punto no exceda 4.00g? b) ¿Qué peso aparente tendría la piloto en este punto?

5.53 ¡No se moje! Se ata un cordón a una cubeta con agua, la cual se gira en un círculo vertical de radio 0.600 m. ¿Qué rapidez máxima debe tener la cubeta en el punto más alto para no derramar agua?

5.54 Una bola de boliche que pesa 71.2 N cuelga del techo atada a una cuerda de 3.80 m. Se tira de la bola hacia un lado y luego se suelta; la bola oscila como péndulo. Al pasar la cuerda por la vertical, la rapidez de la bola es de 4.20 m/s. a) ¿Qué aceleración (dirección y magnitud) tiene la bola en ese instante? b) ¿Qué tensión hay en la cuerda en ese instante?

Problemas

5.55 Dos cuerdas están unidas a un cable de acero que sostiene un peso colgante como se muestra en la figura 5.53. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre que muestre todas las cuerdas que actúan sobre el nudo que une las dos cuerdas al cable de acero. Con base en su diagrama de fuerzas, ¿cuál cuerda estará sometida a mayor tensión? b) Si la tensión máxima que una cuerda resiste sin romperse es de 5000 N, determine el valor máximo del peso colgante que las cuerdas pueden sostener sin peligro. Puede despreciarse el peso de las cuerdas y del cable.

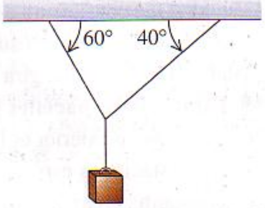


Figura 5.53 Problema 5.55.

5.56 En la figura 5.54, un obrero levanta un peso w tirando de una cuerda con una fuerza $\vec{F}$ hacia abajo. La polea superior está unida al techo con una cadena, y la inferior está unida al peso con otra cadena. En términos de w, determine la tensión en cada cadena y la magnitud de $\vec{F}$ si el peso sube con rapidez constante. Incluya el o los diagramas de cuerpo libre que usó para obtener sus respuestas. Suponga que los pesos de la cuerda, poleas y cadenas son insignificantes.

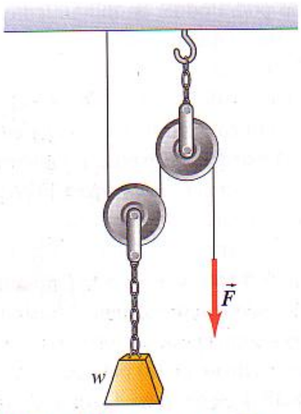


Figura 5.54 Problema 5.56.

5.57 Un hombre está empujando un refrigerador de modo que suba por una rampa con rapidez constante. La rampa tiene un ángulo α sobre la horizontal, pero el hombre aplica una fuerza *horizontal* $\vec{F}$. Calcule la magnitud de $\vec{F}$ en términos de α y la masa m del refrigerador. Puede hacerse caso omiso de la fricción sobre el refrigerador.

5.58 Cuerda con masa. En casi todos los problemas de este libro, las cuerdas, cordones o cables tienen una masa tan pequeña en comparación con la de los demás objetos del problema que puede hacerse caso omiso de ella. Pero si la cuerda es el *único* objeto del problema, obviamente no podemos despreciar su masa. Suponga que tenemos una cuerda para tender atada a dos postes (Fig. 5.55). La cuerda tiene masa M y cada extremo forma un ángulo θ con la horizontal. Determine a) la tensión en los extremos de la cuerda y b) la tensión en el punto más bajo. c) ¿Por qué no podemos tener $\theta = 0$? (Véase la pregunta para análisis P5.3.) d) Analice sus resultados de las partes (a) y (b) en el límite en que $\theta \to 90°$. La curva de la cuerda, o de cualquier cable flexible que cuelga bajo su propio peso, se denomina catenaria. Si desea leer un tratamiento más avanzado de esta curva, consulte K. R. Symon, *Mechanics*, 3a. ed. (Addison-Wesley, Reading, MA, 1971), pp. 237-241.

Figura 5.55 Problema 5.58.

5.59 Otra cuerda con masa. Un bloque con masa M está unido al extremo inferior de una cuerda vertical uniforme con masa m y longitud L. Se aplica una fuerza constante $\vec{F}$ hacia arriba al extremo superior de la cuerda; esto hace que la cuerda y el bloque se aceleren hacia arriba. Calcule la tensión en la cuerda a una distancia x del extremo superior de la cuerda, donde x puede tener cualquier valor entre 0 y L.

5.60 Un bloque de masa m_1 se coloca en un plano inclinado con ángulo α, conectado a un bloque colgante de masa m_2 mediante un cordel que pasa por una polea pequeña sin fricción (Fig. 5.56). Los coeficientes de fricción estática y cinética son μ_s y μ_k. Determine la masa m_2 tal que el bloque m_1 a) sube y b) baja por el plano con rapidez constante una vez puesto en movimiento. c) ¿En qué intervalo de valores de m_2 los bloques permanecen en reposo si se sueltan del reposo?

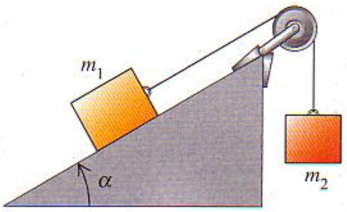


Figura 5.56 Problema 5.60.

5.61 El bloque A de la figura 5.57 pesa 60.0 N. El coeficiente de fricción estática entre el bloque y la superficie en la que descansa es de 0.25. El peso w es de 12.0 N, y el sistema está en equilibrio. Calcule la fuerza de fricción ejercida sobre el bloque A. b) Determine el peso máximo w con el cual el sistema permanecerá en equilibrio.

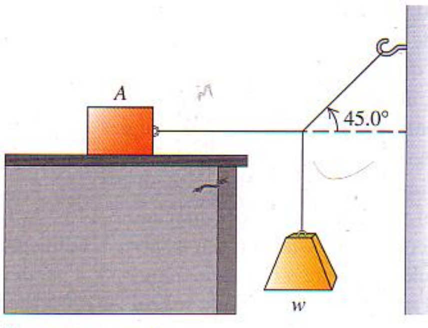


Figura 5.57 Problema 5.61.

5.62 El bloque A de la figura 5.58 pesa 1.20 N, y el B, 3.60 N. El coeficiente de fricción cinética entre todas las superficies es de 0.300. Determine la magnitud de la fuerza horizontal $\vec{F}$ necesaria para arrastrar el bloque B a la izquierda con rapidez constante a) si A descansa sobre B y se mueve con él (Fig. 5.58a); b) si A no se mueve (Fig. 5.58b).

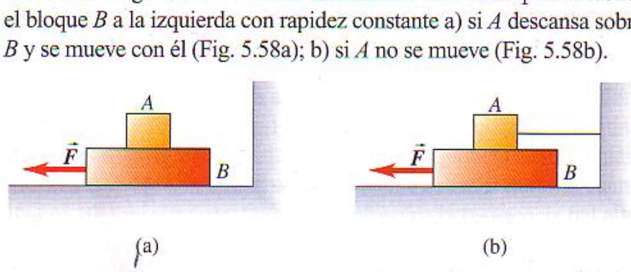


Figura 5.58 Problema 5.62.

5.63 Un lavaventanas empuja hacia arriba su cepillo sobre una ventana vertical con rapidez constante aplicando una fuerza $\vec{F}$ (Fig. 5.59). El cepillo pesa 12.0 N y el coeficiente de fricción cinética es $\mu_k = 0.150$. Calcule a) la magnitud de $\vec{F}$ y b) la fuerza normal ejercida por la ventana sobre el cepillo.

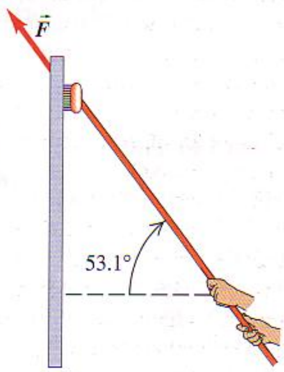


Figura 5.59 Problema 5.63.

5.64 Salto volador de una pulga. Una película de alta velocidad (3500 cuadros/segundo) del salto de una pulga de 210 μg produjo los datos que permitieron trazar la gráfica de aceleración del insecto en función del tiempo de la figura 5.60. (Véase "The Flying Leap of the Flea", por M. Rothschild *et al.* en el *Scientific American* de noviembre de 1973.) La pulga tenía unos 2 mm de longitud y saltó con un ángulo de despegue casi vertical. Haga mediciones en la gráfica que le permitan contestar las preguntas siguientes. a) ¿Qué fuerza externa neta *inicial* actúa sobre la pulga? Compárela con el peso de la pulga. b) ¿Qué fuerza externa neta *máxima* actúa sobre la pulga? ¿Cuándo se presenta esa fuerza máxima? c) ¿Qué rapidez máxima alcanzó la pulga?

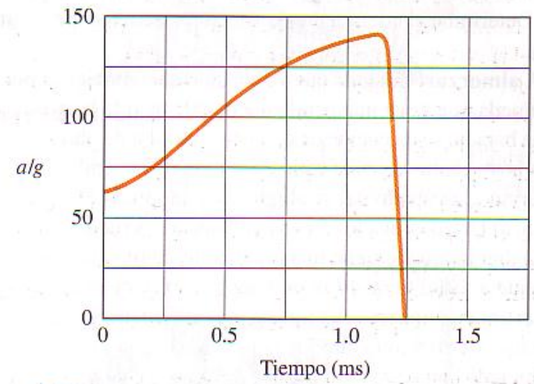


Figura 5.60 Problema 5.64.

5.65 Un cohete de 25 000 kg despega verticalmente de la Tierra con aceleración constante. Durante el movimiento considerado en este problema, suponga que g se mantiene constante (véase el capítulo 12). Dentro del cohete, un instrumento de 15.0 N cuelga de un alambre que resiste una tensión máxima de 35.0 N. a) Determine el tiempo mínimo en que el cohete puede alcanzar la barrera del sonido (330 m/s) sin romper el alambre, y el empuje vertical máximo de los motores del cohete en esas condiciones. b) ¿A qué altura sobre la superficie terrestre está el cohete cuando rompe la barrera del sonido?

5.66 Una persona de 72 kg está parada sobre una báscula en un elevador de un rascacielos. El elevador parte del reposo y asciende con una rapidez que varía con el tiempo según $v(t) = (3.0\ \text{m/s}^2)t + (0.20\ \text{m/s}^3)t^2$. En $t = 4.0$ s, ¿qué marca la báscula?

5.67 Diseño de elevadores. Imagine que está diseñando un elevador para un hospital. La fuerza que el piso del elevador ejercerá sobre un pasajero no debe exceder 1.60 veces el peso del pasajero. El elevador acelera hacia arriba con aceleración constante una distancia de 3.0 m y luego comienza a frenarse. ¿Qué rapidez máxima alcanza el elevador?

5.68 Imagine que trabaja para un transportista. Su trabajo consiste en pararse junto a la base de una rampa de 8.0 m de longitud inclinada 37° arriba de la horizontal, tomar paquetes de una banda transportadora y empujarlos rampa arriba. El coeficiente de fricción cinética entre los paquetes y la rampa es $\mu_k = 0.30$. a) ¿Qué rapidez necesitará imprimir a los paquetes en la base de la rampa para que tengan rapidez cero en el tope de la rampa? b) Supuestamente, una compañera de trabajo toma los paquetes cuando llegan al tope de la rampa, pero no logra sujetar uno y ese paquete se desliza rampa abajo. ¿Qué rapidez tiene el paquete cuando llega a donde usted está?

5.69 Un martillo cuelga del techo de un autobús atado con una cuerda ligera. El techo es paralelo a la carretera. El autobús viaja en línea recta por un camino horizontal. Se observa que el martillo cuelga en reposo con respecto al autobús cuando el ángulo entre la cuerda y el techo es de 74°. ¿Qué aceleración tiene el autobús?

5.70 Una rondana de acero está suspendida dentro de una caja vacía por un hilo ligero unido a la tapa de la caja. La caja baja resbalando por una rampa larga que tiene una inclinación de 37° sobre la horizontal. La masa de la caja es de 180 kg. Una persona de 55 kg está sentada dentro de la caja (con una linterna). Mientras la caja resbala por la rampa, la persona ve que la rondana está en reposo respecto a la caja cuando el hilo forma un ángulo de 68° con la tapa de la caja. Determine el coeficiente de fricción cinética entre la rampa y la caja.

5.71 ¡A almorzar! Imagine que va bajando en motocicleta por una calle húmeda que tiene una pendiente de 20° bajo la horizontal. Al iniciar la bajada, se da cuenta de que una cuadrilla de obreros ha cavado un hoyo profundo en la calle en la base de la pendiente. Un tigre siberiano, escapado del zoológico, ha adoptado el hoyo como vivienda. a) Usted aplica los frenos y bloquea sus ruedas en la cima de la pendiente, donde tiene una rapidez de 20 m/s. La calle inclinada frente a usted tiene 40 m de longitud. ¿Caerá en el agujero y se convertirá en almuerzo del tigre o logrará detenerse antes? (Los coeficientes de fricción entre los neumáticos de la moto y el pavimento mojado son $\mu_s = 0.90$ y $\mu_k = 0.70$.) b) ¿Qué rapidez inicial deberá tener para detenerse justo antes de llegar al hoyo?

5.72 En el sistema de la figura 5.49, el bloque A tiene masa m_A, el bloque B tiene masa m_B y la cuerda que los une tiene una masa *distinta de cero* m_{cuerda}. La longitud total de la cuerda es L y la polea tiene radio muy pequeño. Considere que la cuerda no cuelga en su tramo horizontal. a) Si no hay fricción entre el bloque A y la mesa, ¿qué aceleración tienen los bloques en el instante en que un tramo d de cuerda cuelga verticalmente entre la polea y el bloque B? Al caer B, ¿la magnitud de la aceleración del sistema aumentará, disminuirá o se mantendrá constante? Explique. b) Sea $m_A = 2.00$ kg, $m_B = 0.400$ kg, $m_{\text{cuerda}} = 0.160$ kg y $L = 1.00$ m. Suponga que hay fricción entre el bloque A y la mesa ($\mu_k = 0.200$ y $\mu_s = 0.250$). Calcule la distancia d mínima tal que los bloques comiencen a moverse si inicialmente estaban en reposo. c) Repita la parte (b) para el caso en que $m_{\text{cuerda}} = 0.040$ kg. ¿Se moverán los bloques?

5.73 Si el coeficiente de fricción estática entre una mesa y una cuerda gruesa uniforme es μ_s, ¿qué fracción de la cuerda puede colgar por el borde de la mesa sin que la cuerda resbale?

5.74 Una mujer trata de empujar una caja de masa m, llena de libros, para subirla por una rampa que tiene un ángulo α sobre la horizontal. Los coeficientes de fricción entre la rampa y la caja son μ_s y μ_k. La fuerza $\vec{F}$ aplicada por la mujer es *horizontal*. a) Si μ_s es mayor que cierto valor crítico, la mujer no puede poner en movimiento la caja rampa arriba, por más fuerte que empuje. Calcule dicho valor crítico. b) Suponga que μ_s es menor que el valor crítico. ¿Qué magnitud de fuerza debe aplicar la mujer para mantener la caja subiendo con rapidez constante?

5.75 Una caja de 30.0 kg está inicialmente en reposo en la plataforma de una camioneta de 1500 kg. El coeficiente de fricción estática entre la caja y la plataforma es de 0.30, y el de fricción cinética, de 0.20. Antes de cada una de las aceleraciones que se dan en seguida, la camioneta viaja hacia el norte con rapidez constante. Obtenga la magnitud y dirección de la fuerza de fricción que actúa sobre la caja cuando la camioneta adquiere una aceleración de a) 2.20 m/s² al norte y b) 3.40 m/s² al sur.

5.76 ¿Exceso de velocidad? La camioneta del problema 5.75 viaja con rapidez constante por una carretera rural donde el límite de velocidad es 72 km/h. Al ver un letrero de alto, el conductor aplica los frenos y se detiene en una distancia de 47.0 m. De repente, un policía salta de detrás de un arbusto y entrega al conductor una multa por exceso de velocidad. Cuando el conductor protesta que iba a menos del límite, el policía contesta: "Vi que esa caja se deslizaba de la parte de atrás hasta el frente de la plataforma. Para que se deslizara así, la frenada tuvo que ser muy violenta, así que usted iba a exceso de velocidad." ¿El juez encargado del caso aceptará el argumento del policía? (Suponga que el juez, como usted, tiene conocimientos de física.)

5.77 Tito usa una cuerda raída para tirar de una caja sobre un piso horizontal. La tensión máxima que resiste la cuerda es $T_{\text{máx}}$ y el coeficiente de fricción cinética es μ_k. a) Demuestre que el peso máximo que Tito puede arrastrar con rapidez constante es $T_{\text{máx}}/(\text{sen}\,\theta)$, donde $\theta = \arctan \mu_k$ es el ángulo de la cuerda arriba de la horizontal. b) La respuesta a (a) sugiere que Tito puede tirar de un peso casi infinito con un trozo de telaraña si μ_k se acerca a cero. Explique.

5.78 Falla el motor del avión del ejercicio 5.14 ($F = 0$) y planea con rapidez constante hasta aterrizar a salvo. La dirección del vuelo es un ángulo constante α (llamado *ángulo de planeación*) bajo la horizontal (Fig. 5.61). a) Calcule la magnitud de la fuerza de sustentación L (perpendicular al plano de las alas y a la dirección del vuelo) y del arrastre f en términos de w y α. b) Demuestre que $\alpha = \arctan(f/L)$. c) Un Cessna 182 (una avioneta monomotor) cargada pesa 12 900 N y tiene 1300 N de arrastre a 130 km/h. Si su motor falla a 2500 m de altitud, ¿qué distancia horizontal máxima podrá planear en busca de un lugar seguro donde aterrizar? d) Justifique la afirmación de que "es el arrastre, no la gravedad, lo que hace descender a la avioneta".

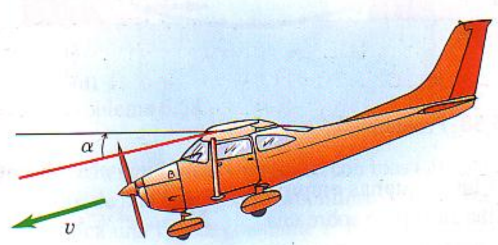


Figura 5.61 Problema 5.78.

5.79 Empuje. El piloto del Cessna 182 de la parte (c) del problema 5.78 logra que el motor arranque otra vez. Aplica potencia máxima y la avioneta se eleva en línea recta con cierto ángulo sobre la horizontal. Vuela con rapidez constante de 130 km/h, pesa 12 900 N y tiene 1300 N de arrastre. El indicador de tasa de ascenso del tablero de instrumentos indica que la avioneta está ganando altitud a tasa constante de 5.00 m/s (300 m/min). Determine la magnitud del empuje (la fuerza hacia adelante producida por el motor). (*Sugerencia:* El empuje actúa en la dirección de movimiento de la avioneta.)

5.80 Pérdida de carga. Una caja de 12.0 kg descansa en el piso plano de un camión. Los coeficientes de fricción entre la caja y el piso son $\mu_s = 0.19$ y $\mu_k = 0.15$. El camión se detiene ante un letrero de alto y luego arranca con aceleración de 2.20 m/s^2. Si la caja está a 1.80 m del borde trasero del camión cuando éste arranca, ¿cuánto tarda la caja en caerse por atrás del camión? ¿Qué distancia recorre el camión en ese tiempo?

5.81 El bloque *A* de la figura 5.62 pesa 1.40 N, y *B*, 4.20 N. El coeficiente de fricción cinética entre todas las superficies es de 0.30. Calcule la magnitud de la fuerza horizontal $\vec{F}$ necesaria para arrastrar *B* a la izquierda con rapidez constante si *A* y *B* están conectados por un cordel flexible que pasa por una polea fija sin fricción.

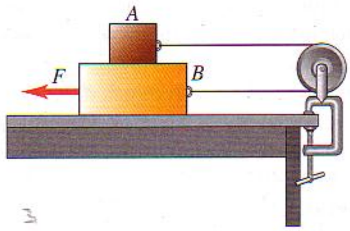


Figura 5.62 Problema 5.81.

5.82 Imagine que forma parte de un grupo de diseñadores para una exploración futura del planeta Marte, donde $g = 3.7$ m/s^2. Una exploradora saldrá de un vehículo que viaja horizontalmente a 33 m/s cuando esté a una altura de 1200 m sobre la superficie y luego caerá libremente durante 20 s. En ese momento, un sistema portátil avanzado de propulsión (PAPS por sus siglas en inglés) ejercerá una fuerza constante que reducirá la rapidez de la exploradora a cero en el instante en que toque la superficie. La masa total (exploradora, traje, equipo y PAPS) es de 150 kg. Suponga que el cambio de masa del PAPS es insignificante. Determine las componentes horizontal y vertical de la fuerza que el PAPS deberá ejercer, y durante cuánto tiempo deberá ejercerla. Haga caso omiso de la resistencia del aire.

5.83 El bloque *A* de la figura 5.63 tiene masa de 4.00 kg, y el *B*, de 12.0 kg. El coeficiente de fricción cinética entre *B* y la superficie horizontal es 0.25. a) ¿Qué masa tiene el bloque *C* si *B* se mueve a la derecha con aceleración de 2.00 m/s^2? b) ¿Qué tensión hay en cada cuerda en tal situación?

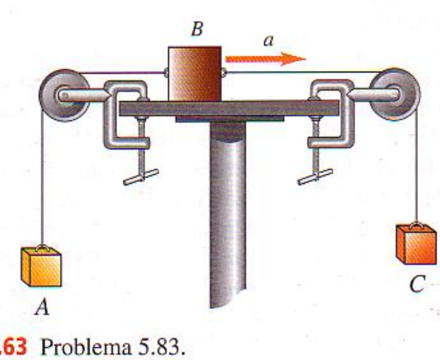


Figura 5.63 Problema 5.83.

5.84 Dos bloques conectados por un cordel que pasa por una polea pequeña sin fricción descansan en planos sin fricción (Fig. 5.64). a) ¿Hacia dónde se moverá el sistema cuando los bloques se suelten del reposo? b) ¿Qué aceleración tendrán los bloques? c) ¿Qué tensión hay en el cordel?

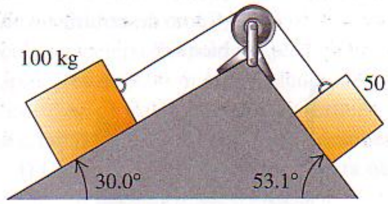


Figura 5.64 Problema 5.84.

5.85 Determine la aceleración de cada bloque de la figura 5.65 en términos de m_1, m_2 y *g*. No hay fricción en ninguna parte del sistema.

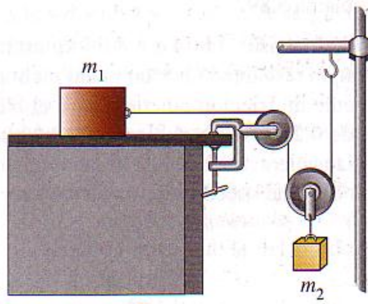


Figura 5.65 Problema 5.85.

5.86 El bloque *B* de masa m_B descansa sobre el bloque *A*, de masa m_A, que a su vez está sobre una mesa horizontal (Fig. 5.66). El coeficiente de fricción cinética entre *A* y la mesa es μ_k y el coeficiente de fricción estática entre *A* y *B* es μ_s. Un hilo atado al bloque *A* pasa por una polea sin masa ni fricción, con el bloque *C* colgando en el otro extremo. ¿Qué masa máxima m_C puede tener *C* de modo que *A* y *B* aún se deslicen juntos cuando el sistema se suelte del reposo?

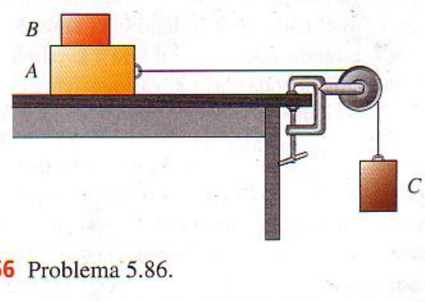


Figura 5.66 Problema 5.86.

5.87 Dos objetos con masas de 5.00 kg y 2.00 kg cuelgan 0.600 m sobre el piso atados a los extremos de un cordel de 6.00 m que pasa por una polea sin fricción. Los objetos parten del reposo. Calcule la altura máxima que alcanza el objeto de 2.00 kg.

5.88 Fricción en un elevador. Imagine que viaja en un elevador hacia el piso 18 de su edificio. El elevador acelera hacia arriba con $a = 1.90$ m/s^2. Junto a Ud. está una caja que contiene su nueva computadora; la caja y su contenido tienen una masa total de 28.0 kg. Mientras el elevador está acelerando hacia arriba, usted empuja la caja horizontalmente para deslizarla con rapidez constante hacia la puerta del elevador. Si el coeficiente de fricción cinética entre la caja y el piso del elevador es $\mu_k = 0.32$, ¿qué magnitud de fuerza debe aplicar?

5.89 Un bloque se coloca contra el frente vertical de un carrito como se muestra en la figura 5.67. ¿Qué aceleración debe tener el carrito para que el bloque A no caiga? El coeficiente de fricción estática entre el bloque y el carro es μ_s. ¿Cómo describiría un observador en el carro el comportamiento del bloque?

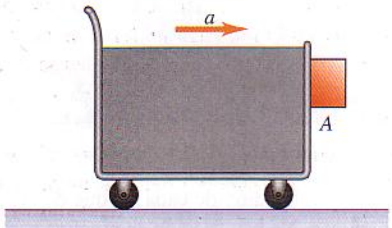


Figura 5.67 Problema 5.89.

5.90 Dos bloques de masas 4.00 kg y 8.00 kg están conectados por un cordel y bajan resbalando por un plano inclinado 30° (Fig. 5.68). El coeficiente de fricción cinética entre el bloque de 4.00 kg y el plano es de 0.25, y entre el bloque de 8.00 kg y el plano, 0.35. a) Calcule la aceleración de cada bloque. b) Calcule la tensión en el cordel. c) ¿Qué sucede si se invierten las posiciones de los bloques?

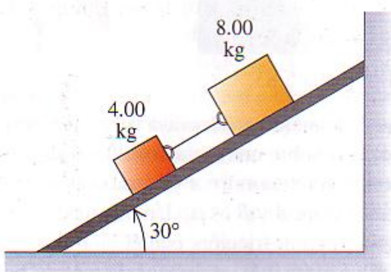


Figura 5.68 Problema 5.90.

5.91 El bloque A, de peso $3w$, resbala con rapidez constante bajando por un plano S inclinado 36.9° mientras la tabla B, de peso w, descansa sobre A, estando sujeta con un hilo a la pared (Fig. 5.69). a) Dibuje un diagrama de todas las fuerzas que actúan sobre el bloque A. b) Si el coeficiente de fricción cinética es igual entre A y B y entre S y A, determine su valor.

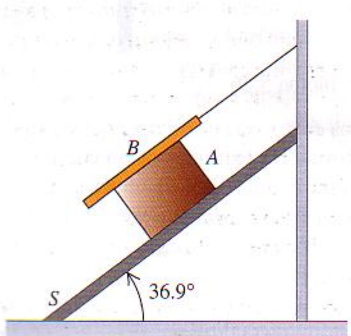


Figura 5.69 Problema 5.91.

5.92 Un hombre de 70.0 kg está en una plataforma de 25.0 kg y tira de una cuerda que pasa por una polea en el techo y está sujeta en el otro extremo a la plataforma. Puede hacerse caso omiso de las masas de la cuerda y la polea, y ésta no tiene fricción. La cuerda está vertical a ambos lados de la polea. a) ¿Con qué fuerza debe tirar el hombre para que él y la plataforma tengan una aceleración hacia arriba de 1.80 m/s^2? b) ¿Qué aceleración tiene la cuerda relativa a él?

5.93 Dos bloques de masas m_1 y m_2 se apilan como en la figura 5.70 y se colocan en una superficie horizontal sin fricción. Hay fricción entre los bloques. Se aplica una fuerza externa de magnitud F al bloque superior con un ángulo α bajo la horizontal. a) Si los bloques se mueven juntos, calcule su aceleración. b) Demuestre que los bloques se mueven juntos sólo si

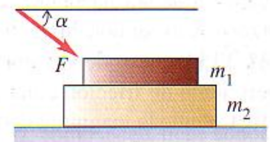


Figura 5.70 Problema 5.93.

$$F \leq \frac{\mu_s m_1 (m_1 + m_2) g}{m_2 \cos\alpha - \mu_s (m_1 + m_2) \operatorname{sen} \alpha}$$

donde μ_s es el coeficiente de fricción estática entre los bloques.

5.94 Curva peraltada I. Una curva de 120 m de radio en un camino horizontal tiene el peralte apropiado para una rapidez de 20 m/s. Si un coche la toma a 30 m/s, ¿qué coeficiente mínimo de fricción estática debe haber entre las ruedas y el camino para no derrapar?

5.95 Curva peraltada II. Considere un camino húmedo peraltado como el del ejemplo 5.24 (sección 5.4), donde hay un coeficiente de fricción estática de 0.30 y un coeficiente de fricción cinética de 0.25 entre los neumáticos y el camino. El radio de la curva es $R = 50$ m. a) Si el ángulo de peralte es $\beta = 25°$, ¿qué rapidez *máxima* puede tener el coche antes de resbalar peralte *arriba*? b) ¿Qué rapidez *mínima* debe tener para no resbalar peralte *abajo*?

5.96 Máxima rapidez segura. Imagine que, en su ruta diaria a la universidad, el camino describe una curva grande que es aproximadamente un arco de círculo. Usted ve el letrero de advertencia al principio de la curva, que indica una rapidez máxima de 55 mi/h. También nota que la curva no tiene peralte alguno. En un día seco con muy poco tráfico, usted ingresa en la curva con una rapidez constante de 80 mi/h y siente que el auto derrapará si no reduce rápidamente su velocidad. Esto lo lleva a concluir que su rapidez está en el límite de seguridad para la curva. No obstante, recuerda haber leído que, en pavimiento seco, los neumáticos nuevos tienen un coeficiente medio de fricción estática de aproximadamente 0.76, mientras que, en las peores condiciones invernales para conducir, la carretera podría estar cubierta de hielo húmedo, cuyo coeficiente de fricción estática llega a ser de 0.20. No es desusado que haya hielo húmedo en esta carretera, así que usted se pregunta si el límite de velocidad indicado en el letrero se refiere al peor de los casos. a) Estime el radio de la curva a partir de su experiencia a 80 mi/h en condiciones secas. b) Use esa estimación para determinar el límite máximo de velocidad en la curva en las peores condiciones de hielo húmedo. Compárelo con el límite del letrero. ¿El letrero está engañando a los conductores? c) En un día lluvioso, el coeficiente de fricción estática sería aproximadamente 0.37. Determine la rapidez máxima segura en la curva en tales condiciones. ¿Su respuesta le ayuda a entender el letrero de límite de velocidad?

5.97 Imagine que conduce en un día lluvioso por una carretera de un solo sentido, que es horizontal y tiene dos carriles. Usted conduce por el segundo carril en un tramo recto, pero sabe que 0.80 km más adelante inicia una curva con forma de arco circular. Su rapidez actual es de 27 m/s (97 km/h) y sabe, por experiencia, que en pavimento seco ésta es la rapidez máxima con que puede tomar sin peligro la curva inminente. Sin embargo, el pavimento está mojado y usted sabe que la lluvia lo hace resbaloso, reduciendo el coeficiente de fricción estática a la mitad del valor que tiene en condiciones secas. De repente, observa que, 0.50 km atrás, viene un auto por el otro carril a gran velocidad, que usted estima en 36 m/s (129 km/h). Al parecer, el conductor de ese auto no vio el letrero que advierte de la curva inminente, pues no ha disminuido su velocidad. Usted se da cuenta de que ese auto podría alcanzarlo en la primera sección de la curva, derrapar e inmiscuirlo a usted en un accidente grave. a) En la carretera mojada, ¿cuál es la máxima rapidez segura para tomar la curva? b) Si frena con aceleración constante de modo que tenga la rapidez calculada en (a), ¿dónde estará el segundo auto cuando usted ingrese en la curva? ¿Es probable un choque?

5.98 Imagine que va en un autobús escolar. Cuando el autobús toma una curva plana con rapidez constante. Una lonchera de 0.500 kg colgada del techo con un cordón de 1.80 m pende en reposo relativo al camión y el cordón forma un ángulo de 30.0° con la vertical. En esta posición, la lonchera está a 50.0 m del centro de curvatura de la curva. ¿Qué rapidez v tiene el camión?

5.99 Problema del mono y las bananas. Un mono de 20 kg sujeta firmemente una cuerda ligera que pasa por una polea sin fricción y está atada a un racimo de plátanos de 20 kg (Fig. 5.71). El mono ve los plátanos y comienza a trepar por la cuerda para alcanzarlos. a) Al subir el mono, ¿los plátanos suben, bajan o no se mueven? b) Al subir el mono, ¿la distancia entre él y los plátanos disminuye, aumenta o no cambia? c) El mono suelta la cuerda. ¿Qué pasa con la distancia entre él y los plátanos mientras él cae? d) Antes de tocar el suelo, el mono sujeta la cuerda para detener su caída. ¿Qué sucede con los plátanos?

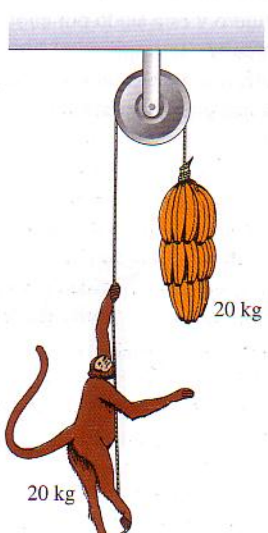


Figura 5.71 Problema 5.99.

5.100 Se lanza una roca hacia abajo en agua con rapidez de $3mg/k$, donde k es el coeficiente de la ecuación (5.7). Suponga que la relación entre resistencia del fluido y rapidez es la ecuación (5.7) y calcule la rapidez de la roca en función del tiempo.

5.101 Una roca de masa $m = 3.00$ kg cae desde el reposo en un medio viscoso. Sobre ella actúan una fuerza neta constante hacia abajo de 18.0 N (combinación de la gravedad y la fuerza de flotación ejercida por el medio) y una fuerza resistiva del fluido $f = kv$, donde v es la rapidez en m/s y $k = 2.20$ N · s/m (véase la sección 5.3). a) Calcule la aceleración inicial a_0. b) Calcule la aceleración cuando la rapidez es de 3.00 m/s. c) Calcule la rapidez cuando la aceleración es $0.1a_0$. d) Calcule la rapidez terminal v_t. e) Obtenga la coordenada, rapidez y aceleración 2.00 s después de iniciado el movimiento. f) Calcule el tiempo necesario para que alcanzar una rapidez de $0.9v_t$.

5.102 Una piedra con masa m se desliza con velocidad inicial v_0 sobre una superficie horizontal. La fuerza retardante F_R que la superficie ejerce sobre la piedra es proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad instantánea de la piedra ($F_R = -kv^{1/2}$). a) Obtenga expresiones para la velocidad y posición de la piedra en función del tiempo. En términos de m, k y v_0. b) ¿En qué tiempo se detendrá la piedra? c) ¿A qué distancia estará la piedra de su punto de partida cuando se detenga?

5.103 Un fluido ejerce una fuerza de flotación hacia arriba sobre un objeto sumergido en él. En la deducción de la ecuación (5.9), se hizo caso omiso de la fuerza de flotación ejercida sobre un objeto por el fluido. No obstante, hay situaciones en las que la densidad del objeto no es mucho mayor que la del fluido, y no es posible hacer caso omiso de la fuerza de flotación. Para una esfera de plástico que cae en agua, usted calcula una rapidez terminal de 0.36 m/s despreciando la flotación, pero la rapidez terminal medida es de 0.24 m/s. ¿Qué fracción del peso es la fuerza de flotación?

5.104 El bloque de 4.00 kg de la figura 5.72 está unido a una varilla vertical con dos hilos. Cuando el sistema gira sobre el eje de la varilla, los hilos se extienden como se muestra y la tensión en el hilo superior es de 80.0 N. a) ¿Qué tensión hay en el otro hilo? b) ¿Cuántas revoluciones por minuto (rpm) da el sistema? c) Calcule las rpm con las que el hilo inferior pierde toda tensión. d) Explique qué sucede si el número de rpm es menor que en (c).

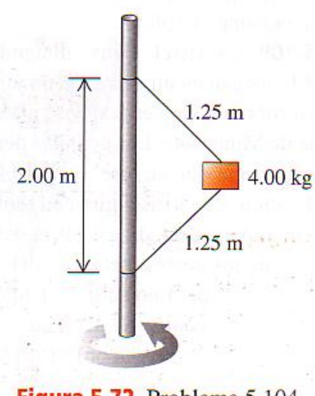


Figura 5.72 Problema 5.104.

5.105 La ecuación (5.10) es válida para el caso en que la velocidad inicial es cero. a) Deduzca la ecuación correspondiente para $v_y(t)$ cuando el objeto que cae tiene una velocidad inicial hacia abajo de magnitud v_0. b) Para el caso en que $v_0 < v_t$, dibuje una gráfica de v_y en función de t y marque v_t en ella. c) Repita la parte (b) para el caso en que $v_0 > v_t$. d) Comente lo que su resultado le dice acerca de $v_y(t)$ cuando $v_0 = v_t$.

5.106 Una piedra pequeña se mueve en agua y la fuerza que el agua ejerce sobre ella está dada por la ecuación (5.7). Antes, se midió la rapidez terminal de la piedra, que es de 2.0 m/s. La piedra se proyecta *hacia arriba* con una rapidez inicial de 6.0 m/s. Puede despreciarse la fuerza de flotación sobre la roca. a) En ausencia de resistencia del fluido, ¿qué altura alcanzaría la piedra y cuánto tardaría en alcanzar esa altura máxima? b) ¿Cómo cambian las respuestas de la parte (a) si se incluyen los efectos de la resistencia del fluido?

5.107 Se observa un auto deportivo de 1350 kg que rueda en línea recta por un pavimento horizontal. Las únicas fuerzas horizontales que actúan sobre él son una fricción constante de rodamiento y la resistencia del aire (proporcional al cuadrado de la rapidez). Se toman los datos siguientes durante un intervalo de 25 s: cuando la rapidez del auto es de 32 m/s, se frena a razón de $-0.42\ \text{m/s}^2$; cuando su rapidez disminuye a 24 m/s, se frena a razón de $-0.30\ \text{m/s}^2$. a) Calcule el coeficiente de fricción rodante y la constante de arrastre del aire D. b) ¿Con qué rapidez constante bajará este auto por una pendiente de 2.2° respecto a la horizontal? c) ¿Qué relación hay entre la rapidez constante en una pendiente de ángulo β y la rapidez terminal de este auto al caer desde un acantilado? Suponga que, en ambos casos, la fuerza de arrastre del aire es proporcional al cuadrado de la rapidez y la constante de arrastre del aire no cambia.

5.108 Una persona de 70 kg viaja en un carrito de 30 kg que se mueve a 12 m/s en la cima de una colina cuya forma es un arco de círculo con radio de 40 m. a) ¿Qué peso aparente tiene la persona cuando el carrito pasa por la cima? b) Determine la rapidez máxima con que el carrito podría remontar la cima sin perder contacto con la superficie. ¿Su respuesta depende de la masa del carrito o de la persona? Explique.

5.109 Carrusel. Cierto diciembre, dos gemelas idénticas, Ana y Ali, juegan en un carrusel (un disco grande montado paralelo al piso sobre un eje vertical central) en el patio de su escuela en el norte de Minnesota. Las gemelas tienen masas idénticas de 30.0 kg. La superficie del carrusel está cubierta de hielo y por tanto no tiene fricción. El carrusel gira con rapidez constante con las gemelas encima. Ana, sentada a 1.80 m del centro del carrusel, debe sujetar uno de los postes metálicos del carrusel con una fuerza horizontal de 60.0 N para no salir despedida. Ali está sentada en el borde, a 3.60 m del centro. a) ¿Con qué fuerza horizontal debe sujetarse para no salir despedida? b) Si Ali sale despedida, ¿qué velocidad horizontal tendrá en ese momento?

5.110 Un pasajero de 85 kg se subió a una rueda de la fortuna como la del ejemplo 5.25. Los asientos viajan en un círculo de 35 m de radio. La rueda gira con rapidez constante y efectúa una revolución cada 25 s. Calcule la magnitud y dirección de la fuerza neta ejercida sobre el pasajero por el asiento cuando él está a) un cuarto de revolución más allá de su punto más bajo y b) un cuarto de revolución más allá de su punto más alto.

5.111 En el juego "Rotor" del parque de diversiones Six Flags Over Texas, la gente se paraba contra la pared interior de un cilindro vertical hueco de 2.5 m de radio. El cilindro comenzaba a girar y, al alcanzar una rotación constante de 0.60 rev/s, el piso en que estaba parada la gente bajaba 0.5 m. La gente quedaba pegada a la pared. a) Dibuje un diagrama de fuerzas para un pasajero una vez que ha bajado el piso. b) ¿Qué coeficiente de fricción estática mínimo se requiere para que un pasajero no resbale hacia la nueva posición del piso? c) ¿La respuesta a (b) depende de la masa del pasajero? (*Nota:* Al final, el cilindro se detenía gradualmente y las personas resbalaban por las paredes hacia el piso.)

5.112 Un estudiante universitario de física se paga su colegiatura actuando en un carnaval errante. Él conduce una moto dentro de una esfera de plástico transparente. Una vez que adquiere suficiente rapidez, describe un círculo vertical de radio 13.0 m. El estudiante tiene masa de 70.0 kg, y su moto, de 40.0 kg. a) ¿Qué rapidez mínima debe tener en el cenit del círculo para no perder contacto con la esfera? b) En la base del círculo, su rapidez es el doble de la calculada en (a). ¿Qué magnitud tiene la fuerza normal ejercida por la esfera sobre la moto en este punto?

5.113 Segunda intención. Un joven conduce un auto Nash Ambassador 1954 clásico con una amiga sentada a su derecha en el lado del copiloto del asiento delantero. El Ambassador tiene asientos corridos planos. Al joven le gustaría estar más cerca de su amiga, y decide usar la física para lograr su objetivo romántico dando una vuelta rápida. a) ¿Deberá dar vuelta al auto a la derecha o a la izquierda para que su amiga se deslice hacia él? b) Si el coeficiente de fricción estática entre la amiga y el asiento es de 0.35 y el auto viaja a 20 m/s (constante), ¿con qué radio máximo de la vuelta la amiga aún se desliza hacia el joven?

5.114 Un bloque pequeño de masa m descansa sobre una mesa horizontal sin fricción a una distancia r de un agujero en el centro de la mesa (Fig. 5.73). Un hilo atado al bloque pequeño pasa por el agujero y está atado por el otro extremo a un bloque suspendido de masa M. Se imprime al bloque pequeño un movimiento circular uniforme con radio r y rapidez v. ¿Qué v se necesita para que el bloque grande quede inmóvil una vez que se le suelta?

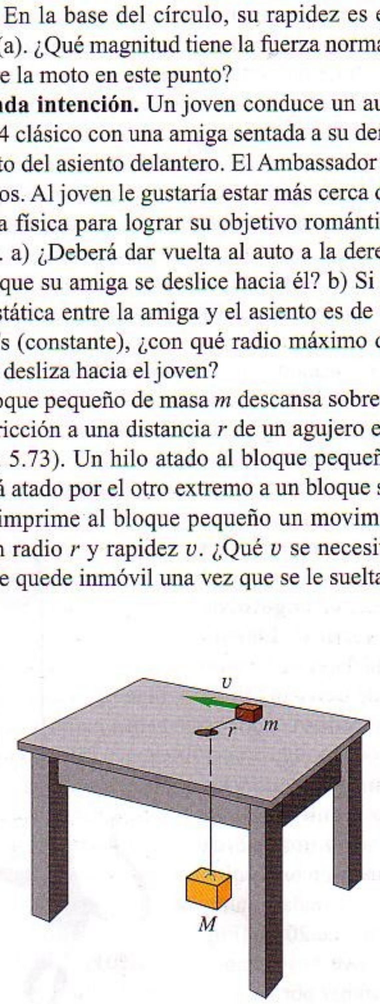


Figura 5.73 Problema 5.114.

5.115 Una cuenta pequeña puede deslizarse sin fricción por un aro circular de 0.100 m de radio que está en un plano vertical. El aro gira con rapidez constante de 4.00 rev/s sobre un diámetro vertical (Fig. 5.74). a) Calcule el ángulo β en que la cuenta está en equilibrio vertical. (Desde luego, tiene aceleración radial hacia el eje.) b) ¿Podría la cuenta mantenerse a la misma altura que el centro del aro? c) ¿Qué sucede si el aro gira a 1.00 rev/s?

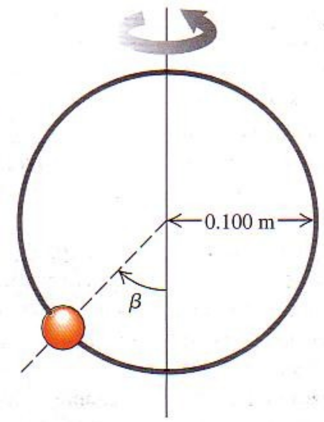


Figura 5.74 Problema 5.115.

5.116 Un modelo de avión de 2.20 kg se mueve en el plano xy de modo que sus coordenadas varían con el tiempo según $x(t) = \alpha - \beta t^3$ y $y(t) = \gamma t - \delta t^2$, donde $\alpha = 1.50$ m, $\beta = 0.120$ m/s^3, $\gamma = 3.00$ m/s y $\delta = 1.00$ m/s^2. a) Calcule las componentes x y y de la fuerza neta en el plano en función de t. b) Dibuje la trayectoria del avión entre $t = 0$ y $t = 3.00$ s, incluyendo en su dibujo vectores que muestren la fuerza neta que actúa sobre el avión en $t = 0$, $t = 1.00$ s, $t = 2.00$ s y $t = 3.00$ s. Para cada uno de estos instantes, relacione la dirección de la fuerza neta con la de giro del avión y diga si la rapidez del avión está aumentando, disminuyendo o no cambia. c) Determine la magnitud y dirección de la fuerza neta en $t = 3.00$ s.

5.117 Una partícula se mueve en una superficie sin fricción con la trayectoria de la figura 5.75 (vista superior). La partícula está inicialmente en reposo en el punto A y comienza a moverse hacia B, aumentando su rapidez a razón constante. De B a C, la partícula sigue un camino circular con rapidez constante. La rapidez sigue constante en la recta de C a D. De D a E, la partícula sigue un camino circular, pero ahora su rapidez disminuye a razón constante. La rapidez sigue disminuyendo a razón constante entre E y F, donde se detiene la partícula. (Los intervalos de tiempo entre los puntos marcados no son iguales.) En cada punto negro de la figura, dibuje flechas para representar la velocidad, la aceleración y la fuerza neta que actúa sobre la partícula. Haga la longitud de las flechas proporcional a la magnitud del vector.

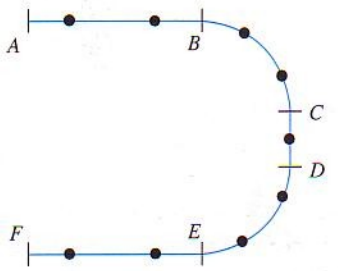


Figura 5.75 Problema 5.117.

5.118 Un carrito de control remoto con masa de 1.60 kg se mueve con $v = 12.0$ m/s (constante) en un círculo vertical dentro de un cilindro hueco de 5.00 m de radio (Fig. 5.76). ¿Qué magnitud tiene la fuerza normal ejercida sobre el coche por las paredes del cilindro a) en el punto A (nadir del círculo vertical)? b) ¿En el punto B (cenit del círculo vertical)?

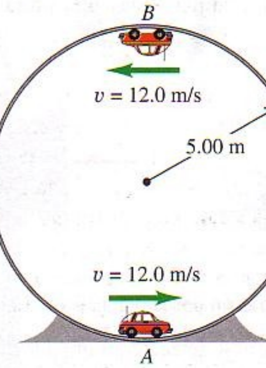


Figura 5.76 Problema 5.118.

5.119 Un bloque pequeño de masa m se coloca dentro de un cono invertido que gira sobre un eje vertical de modo que la duración de una revolución es T (Fig. 5.77). Las paredes del cono forman un ángulo β con la vertical. El coeficiente de fricción estática entre el bloque y el cono es μ_s. Si el bloque ha de mantenerse a una altura h sobre el vértice del cono, ¿qué valores máximo y mínimo puede tener T?

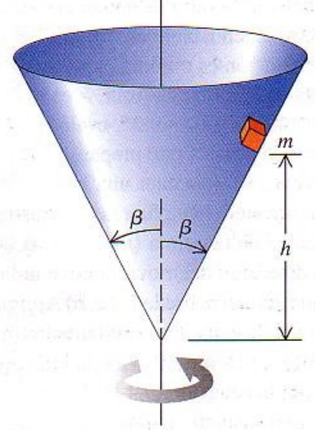
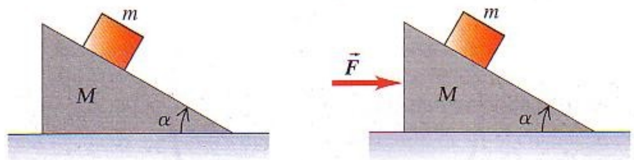


Figura 5.77 Problema 5.119.

Problemas de desafío

5.120 Cuña móvil. Una cuña de masa M descansa en una mesa horizontal sin fricción. Un bloque de masa m se coloca sobre la cuña (Fig. 5.78a). No hay fricción entre el bloque y la cuña. El sistema se suelta del reposo. a) Calcule la aceleración de la cuña y las componentes horizontal y vertical de la aceleración del bloque. b) ¿Sus respuestas a la parte (a) se reducen a los resultados correctos cuando M es muy grande? c) ¿Qué forma tiene la trayectoria del bloque, vista por un observador estacionario?

5.121 Una cuña de masa M descansa en una mesa horizontal sin fricción. Un bloque de masa m se coloca sobre la cuña se aplica una fuerza horizontal $\vec{F}$ a la cuña (Fig. 5.78b). ¿Qué magnitud debe tener $\vec{F}$ para que el bloque permanezca a una altura constante sobre la mesa?



(a) (b)

Figura 5.78 Problemas de desafío 5.120 y 5.121.

5.122 Una caja de peso w se acelera rampa arriba con una cuerda que ejerce una tensión T. La rampa forma un ángulo α con la horizontal, y la cuerda tiene un ángulo θ sobre la rampa. El coeficiente de fricción cinética entre la caja y la rampa es μ_k. Demuestre que la aceleración máxima se da con $\theta = \arctan \mu_k$, sea cual sea el valor de α (en tanto la caja siga en contacto con la rampa).

5.123 Ángulo de fuerza mínima. Se tira de una caja de peso w con rapidez constante sobre un piso horizontal aplicando una fuerza $\vec{F}$ con un ángulo θ sobre la horizontal. El coeficiente de fricción cinética entre el piso y la caja es μ_k. Calcule F en términos de θ, μ_k y w. b) Si $w = 400$ N y $\mu_k = 0.25$, calcule F para θ desde 0° a 90° en incrementos de 10°. Grafique F contra θ. c) Con la expresión general de la parte (a), calcule el valor de θ para el que la F necesaria para mantener una rapidez constante es mínima. (*Sugerencia:* En un punto en el que una función es mínima, ¿qué valor tienen la primera y segunda derivadas de la función? Aquí, F es función de θ.) Para el caso especial de $w = 400$ N y $\mu_k = 0.25$, evalúe este θ óptimo y compare su resultado con la gráfica que preparó en la parte (b).

5.124 Pelota que cae. Se deja caer una pelota desde la azotea de un edificio alto. El aire ejerce una fuerza de arrastre proporcional al cuadrado de la rapidez de la pelota ($f = Dv^2$). a) Dibuje un diagrama que muestre la dirección del movimiento e indique con vectores todas las fuerzas que actúan sobre la bola. b) Aplique la segunda ley de Newton e infiera de la ecuación resultante las propiedades generales del movimiento. c) Demuestre que la bola adquiere una rapidez terminal dada por la ecuación (5.13). d) Deduzca la ecuación de la rapidez en cualquier instante. (*Nota:*

$$\int \frac{dx}{a^2 - x^2} = \frac{1}{a}\,\text{arctanh}\left(\frac{x}{a}\right)$$

donde

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$$

define la tangente hiperbólica.)

5.125 Máquina de Atwood doble. En la figura 5.79, las masas m_1 y m_2 están conectadas por un hilo ligero A que pasa por una polea ligera sin fricción B. El eje de la polea B está conectado por otro hilo ligero C a una masa m_3 pasando por una segunda polea ligera sin fricción D. La polea D está suspendida del techo por su eje. El sistema se suelta del reposo. En términos de m_1, m_2, m_3 y g, a) qué aceleración tiene el bloque m_3? b) ¿Y la polea B? c) ¿Y el bloque m_1? d) ¿Y el bloque m_2? e) ¿Qué tensión tiene el hilo A? f) ¿Y el hilo C? g) ¿Qué dan sus expresiones para el caso especial en que $m_1 = m_2$ y $m_3 = m_1 + m_2$? ¿Es lógico esto?

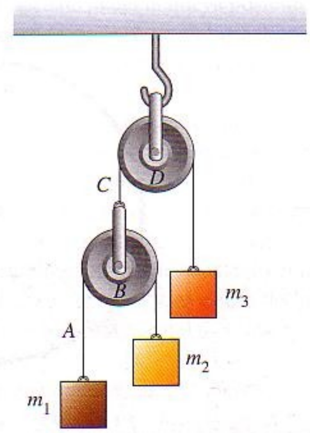


Figura 5.79 Problema de desafío 5.125.

5.126 Las masas de los bloques A y B de la figura 5.80 son 20.0 kg y 10.0 kg, respectivamente. Inicialmente, los bloques están en reposo sobre el piso y conectados por un hilo sin masa que pasa por una polea sin masa ni fricción. Se aplica una fuerza $\vec{F}$ hacia arriba a la polea. Calcule las aceleraciones $\vec{a}_A$ del bloque A y $\vec{a}_B$ del bloque B si F es a) 124 N; b) 294 N; c) 424 N.

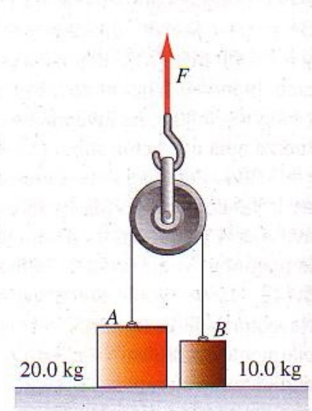


Figura 5.80 Problema de desafío 5.126.

5.127 Una bola se sostiene en reposo en la posición A de la figura 5.81 con dos hilos ligeros. Se corta el hilo horizontal y la bola comienza a oscilar como péndulo. B es el punto más a la derecha que la bola alcanza al oscilar. ¿Qué relación hay entre la tensión del hilo de soporte en la posición B y su valor en A antes de cortarse el hilo horizontal?

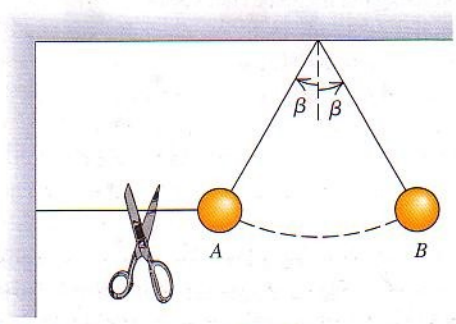


Figura 5.81 Problema de desafío 5.127.