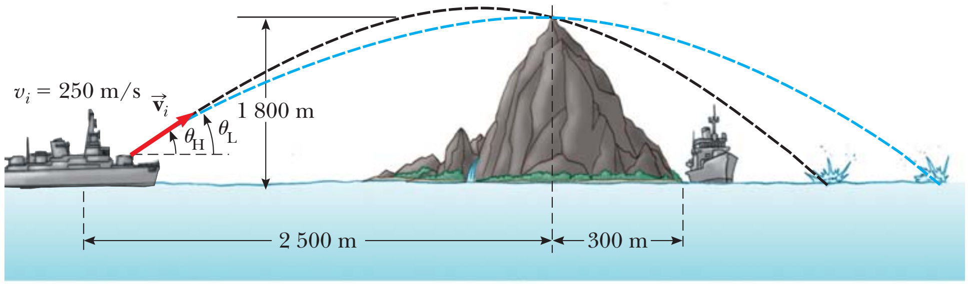


Figura P4.61

62. En la sección **¿Y si...?** del ejemplo 4.5, se afirmó que el intervalo máximo de un esquiador se presenta para un ángulo de lanzamiento θ dado por

$$\theta = 45° - \frac{\phi}{2}$$

donde ϕ es el ángulo que la colina forma con la horizontal en la figura 4.14. Compruebe esta afirmación al derivar esta ecuación.

Respuestas a las preguntas rápidas

4.1 a). Puesto que la aceleración se presenta siempre que la velocidad cambia en cualquier forma (con un aumento o reducción en rapidez, un cambio en dirección o ambos) los tres controles son aceleradores. El acelerador hace que el automóvil aumente rapidez; el freno hace que el auto reduzca rapidez. El volante cambia la dirección del vector velocidad.

4.2 **i**), b). Sólo en un punto, el pico de la trayectoria, los vectores velocidad y aceleración son mutuamente perpendiculares. El vector velocidad es horizontal en dicho punto, y el vector aceleración es descendente. **ii**), a). El vector aceleración siempre se dirige hacia abajo. El vector velocidad nunca es vertical y paralelo al vector aceleración si el objeto sigue una trayectoria como la de la figura 4.8.

4.3 15°, 30°, 45°, 60°, 75°. Mientras mayor sea la altura máxima, más tardará el proyectil en alcanzar dicha altitud y luego cae de vuelta desde ella. De este modo, conforme aumenta el ángulo de lanzamiento, el tiempo de vuelo aumenta.

4.4 **i**), d). Puesto que la aceleración centrípeta es proporcional al cuadrado de la rapidez de la partícula, duplicar la rapidez aumenta la aceleración por un factor de 4. **ii**), b). El periodo es inversamente proporcional a la rapidez de la partícula.

4.5 **i**), b). El vector velocidad es tangente a la trayectoria. Si el vector aceleración debe ser paralelo al vector velocidad, también debe ser tangente a la trayectoria, lo que requiere que el vector aceleración no tenga componente perpendicular a la trayectoria. Si la trayectoria no cambia de dirección, el vector aceleración tendrá una componente radial, perpendicular a la trayectoria. En consecuencia, la trayectoria debe permanecer recta. **ii**), d). Si el vector aceleración debe ser perpendicular al vector velocidad, no debe tener componente tangente a la trayectoria. Por otra parte, si la rapidez está cambiando, *debe* haber una componente de la aceleración tangente a la trayectoria. Por lo tanto, los vectores velocidad y aceleración nunca son perpendiculares en esta situación. Sólo pueden ser perpendiculares si no hay cambio en la rapidez.

Un pequeño remolcador ejerce una fuerza sobre un gran barco y hace que se mueva. ¿Cómo un bote tan pequeño puede hacer que se mueva un objeto tan grande? (Steve Raymer/CORBIS)

5.1 Concepto de fuerza
5.2 Primera ley de Newton y marcos inerciales
5.3 Masa
5.4 Segunda ley de Newton
5.5 Fuerza gravitacional y peso
5.6 Tercera ley de Newton
5.7 Algunas aplicaciones de las leyes de Newton
5.8 Fuerzas de fricción

5 Las leyes del movimiento

En los capítulos 2 y 4 se describió el movimiento de un objeto en términos de su posición, velocidad y aceleración sin tener en cuenta qué impulsa dicho movimiento. Ahora se considera la influencia externa: ¿qué hace a un objeto permanecer en reposo y que otro objeto acelere? Los dos factores principales en los que es necesario reflexionar son las fuerzas que actúan sobre un objeto y la masa del objeto. En este capítulo comienza el estudio de la *dinámica* al discutir las tres leyes de movimiento básicas, las cuales se relacionan con fuerzas y masas y que formuló hace más de tres siglos Isaac Newton.

5.1 Concepto de fuerza

Cada uno tiene una comprensión básica del concepto de fuerza a partir de la experiencia cotidiana. Cuando aleja un plato de comida vacío, ejerce una fuerza sobre él. De igual modo, cuando se lanza o patea una pelota se ejerce una fuerza sobre ella. En estos ejemplos, la palabra *fuerza* se refiere a una interacción con un objeto mediante actividad muscular y algún cambio en la velocidad del objeto. Sin embargo, las fuerzas no siempre causan movimiento. Por ejemplo, cuando está sentado, sobre su cuerpo actúa una fuerza gravitacional y aún así usted permanece fijo. Como segundo ejemplo, puede empujar (en otras palabras, ejercer una fuerza) sobre una gran roca y no ser capaz de moverla.

¿Qué fuerza (si alguna) hace que la Luna orbite la Tierra? Newton respondió ésta y otras preguntas relacionadas al afirmar que las fuerzas son lo que causa cualquier cambio en la velocidad de un objeto. La velocidad de la Luna no es constante porque se mueve en una órbita casi circular en torno a la Tierra. Este cambio en velocidad lo causa la fuerza gravitacional ejercida por la Tierra sobre la Luna.

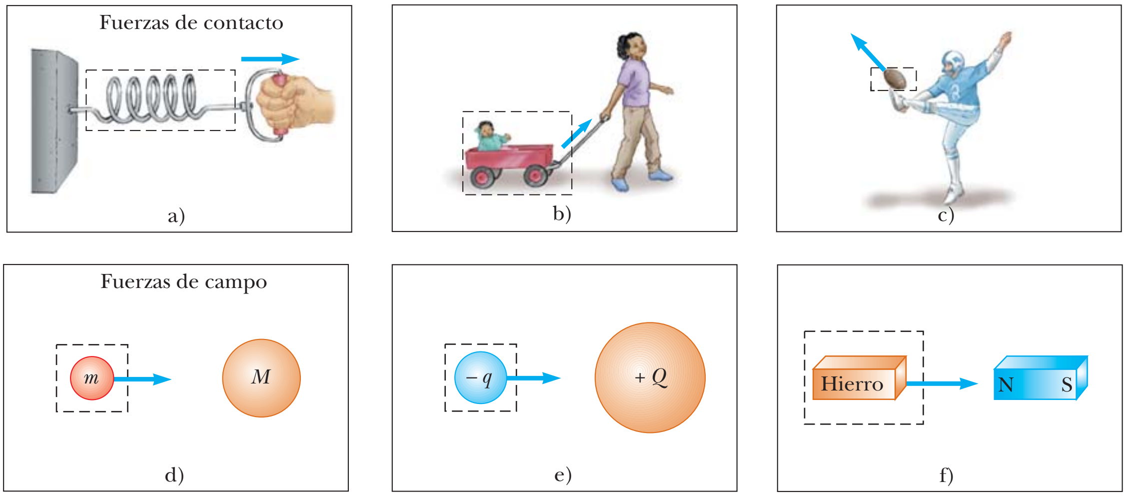


Figura 5.1 Algunos ejemplos de fuerzas aplicadas. En cada caso, sobre el objeto dentro del área limitada por líneas discontinuas se ejerce una fuerza. Algún agente en el ambiente exterior al área del recuadro ejerce una fuerza sobre el objeto.

Cuando un resorte se jala, como en la figura 5.1a, el resorte se estira. Cuando se jala un carrito estacionario, como en la figura 5.1b, el carrito se mueve. Cuando se patea un balón, como en la figura 5.1c, se deforma y se pone en movimiento. Estas situaciones son ejemplos de una clase de fuerzas llamadas *fuerzas de contacto*. Esto es, implican contacto físico entre dos objetos. Otras fuerzas de contacto son la fuerza que ejercen las moléculas de gas sobre las paredes de un contenedor y la fuerza que ejerce su pie sobre el suelo.

Otra clase de fuerzas, conocidas como *fuerzas de campo*, no involucran contacto físico entre dos ejemplos. Estas fuerzas actúan a través del espacio vacío. La fuerza gravitacional de atracción entre dos objetos con masa, que se ilustra en la figura 5.1d, es un ejemplo de esta clase de fuerza. La fuerza gravitacional mantiene a los objetos ligados a la Tierra y a los planetas en órbita alrededor del Sol. Otra fuerza de campo común es la fuerza eléctrica que una carga eléctrica ejerce sobre otra (figura 5.1e). Como ejemplo, estas cargas pueden ser las del electrón y el protón que forman un átomo de hidrógeno. Un tercer ejemplo de fuerza de campo es la fuerza que un imán de barra ejerce sobre un trozo de hierro (figura 5.1f).

La distinción entre fuerzas de contacto y fuerzas de campo no es tan clara como se podría pensar a partir de la discusión anterior. Cuando se examinan a nivel atómico, todas las fuerzas que se clasifican como fuerzas de contacto resultan ser causadas por fuerzas (de campo) eléctricas del tipo que se ilustra en la figura 5.1e. No obstante, al desarrollar modelos para fenómenos macroscópicos, es conveniente usar ambas clasificaciones de fuerzas. Las únicas fuerzas *fundamentales* conocidas en la naturaleza son todas fuerzas de campo: 1) *fuerzas gravitacionales* entre objetos, 2) *fuerzas electromagnéticas* entre cargas eléctricas, 3) *fuerzas fuertes* entre partículas subatómicas y 4) *fuerzas débiles* que surgen en ciertos procesos de decaimiento radiactivo. En la física clásica sólo interesan las fuerzas gravitacional y electromagnética. Las fuerzas fuerte y débil se discutirán en el capítulo 46.


Giraudon/Art Resource

ISAAC NEWTON
Físico y matemático inglés (1642–1727)
Isaac Newton fue uno de los más brillantes científicos de la historia. Antes de cumplir 30 años, formuló los conceptos básicos y leyes de la mecánica, descubrió la ley de gravitación universal e inventó los métodos matemáticos del cálculo. Como consecuencia de sus teorías, Newton fue capaz de explicar los movimientos de los planetas, la baja y el flujo de las mareas y muchas características especiales de los movimientos de la Luna y la Tierra. También interpretó muchas observaciones fundamentales concernientes a la naturaleza de la luz. Sus aportaciones a las teorías físicas dominaron el pensamiento científico durante dos siglos y siguen siendo importantes en la actualidad.

La naturaleza vectorial de la fuerza

Es posible usar la deformación de un resorte para medir fuerza. Suponga que una fuerza vertical se aplica a una balanza de resorte que tiene un extremo superior fijo, como se muestra en la figura 5.2a (página 102). El resorte se estira cuando la fuerza se aplica, y un puntero en la escala lee el valor de la fuerza aplicada. El resorte se puede calibrar al definir una fuerza de referencia $\vec{\mathbf{F}}_1$ como la fuerza que produce una lectura de 1.00 cm. Si ahora se aplica una fuerza hacia abajo diferente $\vec{\mathbf{F}}_2$ cuya magnitud es el doble de la fuerza de referencia $\vec{\mathbf{F}}_1$, como se ve en la figura 5.2b, el puntero se mueve 2.00 cm. La figura 5.2c muestra que el efecto combinado de las dos fuerzas colineales es la suma de los efectos de las fuerzas individuales.

Ahora suponga que la aplicación de las dos fuerzas es simultánea con $\vec{\mathbf{F}}_1$ descendente y $\vec{\mathbf{F}}_2$ horizontal, como se ilustra en la figura 5.2d. En este caso, el puntero lee 2.24 cm.

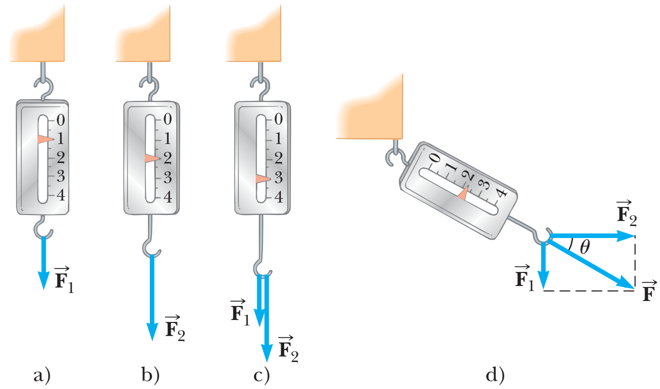


Figura 5.2 La naturaleza vectorial de una fuerza se prueba con una balanza de resorte. a) Una fuerza descendente $\vec{F}_1$ estira el resorte 1.00 cm. b) Una fuerza descendente $\vec{F}_2$ estira el resorte 2.00 cm. c) Cuando $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ son simultáneas, el resorte se estira 3.00 cm. d) Cuando $\vec{F}_1$ es descendente y $\vec{F}_2$ es horizontal, la combinación de las dos fuerzas estira el resorte 2.24 cm.

La fuerza sola $\vec{F}$ que produciría esta misma lectura es la suma de los dos vectores $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$, como se describe en la figura 5.2d. Esto es, $|\vec{F}| = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = 2.24$ unidades, y su dirección es $\theta = \tan^{-1}(-0.500) = -26.6°$. **Puesto que se ha comprobado experimentalmente que las fuerzas se comportan como vectores, debe aplicar las reglas de suma vectorial para obtener la fuerza neta sobre un objeto**.

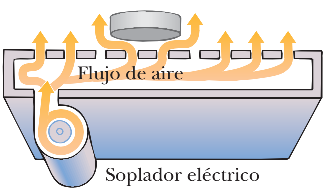


Figura 5.3 En una mesa de hockey de aire, el aire que sopla a través de los hoyos en la superficie permite que el disco se mueva casi sin fricción. Si la mesa no acelera, un disco colocado sobre la mesa permanecerá en reposo.

5.2 Primera ley de Newton y marcos inerciales

El estudio de las fuerzas comienza al formar imágenes de algunas situaciones físicas que involucran un disco sobre una mesa de hockey de aire perfectamente a nivel (figura 5.3). Se espera que el disco permanezca donde se coloca. Ahora piense que su mesa de hockey de aire se ubica en un tren que se mueve con velocidad constante a lo largo de una pista perfectamente uniforme. Si el disco se coloca en la mesa, de nuevo permanece donde se le coloca. Sin embargo, si el tren acelera, el disco comenzaría a moverse a lo largo de la mesa en dirección opuesta a la de la aceleración del tren, igual como un conjunto de papeles en el tablero de su automóvil cae en el asiento delantero cuando pisa el acelerador.

Como se vio en la sección 4.6, es posible observar un objeto en movimiento desde muchos marcos de referencia. La **primera ley del movimiento de Newton**, a veces llamada *ley de la inercia*, define un conjunto especial de marcos de referencia llamados *marcos inerciales*. Esta ley se puede establecer del modo siguiente:

Primera ley de Newton ▶

Si un objeto no interactúa con otros objetos, es posible identificar un marco de referencia en el que el objeto tiene aceleración cero.

Marco de referencia inercial ▶

Tal marco de referencia se llama **marco de referencia inercial**. Cuando el disco está en la mesa de hockey de aire ubicada en el suelo, usted lo observa desde un marco de referencia inercial; no hay interacciones horizontales del disco con cualquier otro objeto y observa que tiene aceleración cero en dicha dirección. Cuando usted está en el tren en movimiento con velocidad constante, también observa el disco desde un marco de referencia inercial. **Cualquier marco de referencia que se mueve con velocidad constante en relación con un marco inercial es, en sí mismo, un marco inercial**. Sin embargo, cuando usted y el tren aceleran, usted observa el disco desde un **marco de referencia no inercial** porque el tren acelera en relación con el marco de referencia inercial de la superficie de la Tierra. Mientras el disco parece acelerar de acuerdo con sus observaciones, se puede identificar un marco de referencia en el cual el disco tiene aceleración cero. Por ejemplo, un observador que está fuera del tren en el suelo ve el disco que se mueve con la misma velocidad que tiene el tren antes de comenzar a acelerar (porque casi no hay fricción para "amarrar" el disco y el tren). Debido a eso, todavía se satisface la primera ley de Newton, aun cuando sus observaciones como pasajero del tren muestren una aceleración aparente en relación con usted.

Un marco de referencia que se mueve con velocidad constante en relación con las estrellas distantes es la mejor aproximación de un marco inercial y, para propósitos de estudio, se considera a la Tierra como tal marco. En realidad la Tierra no es un marco inercial debido a su movimiento orbital en torno al Sol y su movimiento rotacional alrededor de su propio eje, y ambos involucran aceleraciones centrípetas. Sin embargo, estas aceleraciones son pequeñas comparadas con g, y con frecuencia se pueden despreciar. Por esta razón, la Tierra representa un marco inercial, junto con cualquier otro marco unido a él.

Suponga que observa un objeto desde un marco de referencia inercial. (En la sección 6.3 se regresará a observaciones hechas en marcos de referencia no inerciales.) Muy próximos a 1600, los científicos creían que el estado natural de la materia era el estado de reposo. Las observaciones mostraron que los objetos en movimiento finalmente dejaban de moverse. Galileo fue el primero en considerar un planteamiento diferente del movimiento y del estado natural de la materia. Diseñó experimentos mentales y concluyó que no es la naturaleza de un objeto detenerse una vez que se pone en movimiento: más bien, su naturaleza es *resistir el cambio en su movimiento*. En sus palabras: "cualquier velocidad una vez impartida a un cuerpo móvil se mantendrá firme siempre y cuando se retiren las causas externas de retardo". Por ejemplo, una nave espacial que navega a través del espacio vacío con su motor apagado seguirá moviéndose para siempre. *No* buscaría un "estado natural" de reposo.

Dada la discusión de las observaciones realizadas acerca de los marcos de referencia inerciales, se puede plantear un enunciado más práctico de la primera ley del movimiento de Newton:

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.1

Primera ley de Newton

La primera ley de Newton *no* explica lo que sucede con un objeto con *fuerza neta cero*, esto es, múltiples fuerzas que se cancelan; expresa lo que ocurre *en ausencia de fuerzas externas*. Esta diferencia sutil pero importante permite definir la fuerza como la causa de un cambio en el movimiento. La descripción de un objeto bajo el efecto de fuerzas que se equilibran la cubre la segunda ley de Newton.

◀ Otro enunciado de la primera ley de Newton

> En ausencia de fuerzas externas, y cuando se ve desde un marco de referencia inercial, un objeto en reposo se mantiene en reposo y un objeto en movimiento continúa en movimiento con una velocidad constante (esto es, con una rapidez constante en una línea recta).

En otras palabras, **cuando ninguna fuerza actúa sobre un objeto, la aceleración del objeto es cero**. Una conclusión a partir de la primera ley, es que cualquier *objeto aislado* (uno que no interactúa con su entorno) está en reposo o en movimiento con velocidad constante. La tendencia de un objeto a resistir cualquier intento por cambiar su velocidad se llama **inercia**. Dado el enunciado anterior de la primera ley, se puede concluir que un objeto que acelera debe experimentar una fuerza. A su vez, de la primera ley, se puede definir **fuerza** como **aquello que causa un cambio en el movimiento de un objeto**.

Pregunta rápida 5.1 ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto? a) Es posible que un objeto tenga movimiento en ausencia de fuerzas sobre el objeto. b) Es posible tener fuerzas sobre un objeto en ausencia de movimiento del objeto. c) Ni a) ni b) son correctos. d) Tanto a) como b) son correctos.

5.3 Masa

Piense que quiere atrapar ya sea un balón de basquetbol o una bola de boliche. ¿Cuál es más probable que siga moviéndose cuando intenta capturarla? ¿Cuál requiere más esfuerzo para lanzarla? La bola de boliche requiere más esfuerzo. En el lenguaje de la física, se dice que la bola de boliche es más resistente al cambio en su velocidad que la de basquetbol. ¿Cómo se puede cuantificar este concepto?

◀ Definición de masa

La **masa** es la propiedad de un objeto que especifica cuánta resistencia muestra un objeto para cambiar su velocidad y, como se aprendió en la sección 1.1, la unidad del SI de masa es el kilogramo. Los experimentos muestran que mientras más grande sea la masa de un objeto, menos acelera el objeto bajo la acción de una fuerza aplicada conocida.

Para describir la masa en unidades cuantitativas, se realizan experimentos en los que se comparan las aceleraciones que produce una fuerza conocida sobre diferentes objetos. Suponga que una fuerza que actúa sobre un objeto de masa m_1 produce una aceleración $\vec{\mathbf{a}}_1$, y la *misma fuerza* que actúa sobre un objeto de masa m_2 produce una aceleración $\vec{\mathbf{a}}_2$. La relación de las dos masas se define como la relación *inversa* de las magnitudes de las aceleraciones producidas por la fuerza:

$$\frac{m_1}{m_2} \equiv \frac{a_2}{a_1} \qquad \textbf{(5.1)}$$

Por ejemplo, si una fuerza conocida que actúa sobre un objeto de 3 kg produce una aceleración de 4 m/s^2, la misma fuerza aplicada a un objeto de 6 kg produce una aceleración de 2 m/s^2. De acuerdo con un cúmulo de observaciones similares, se concluye que **la magnitud de la aceleración de un objeto es inversamente proporcional a su masa cuando sobre él actúa una fuerza conocida**. Si un objeto tiene una masa conocida, la masa del otro objeto se obtiene a partir de mediciones de aceleración.

La masa es una propiedad inherente de un objeto y es independiente de los alrededores del objeto y del método que se aplica para medirla. Además, la **masa es una cantidad escalar** y, en estos términos, obedece las reglas de la aritmética ordinaria. Por ejemplo, si combina una masa de 3 kg con una masa de 5 kg, la masa total es 8 kg. Este resultado se puede verificar experimentalmente al comparar la aceleración que una fuerza conocida proporciona a diferentes objetos por separado con la aceleración que la misma fuerza proporciona a los mismos objetos combinados como una unidad.

Masa y peso son cantidades diferentes ▶

La masa no se debe confundir con el peso. La **masa y el peso son dos cantidades diferentes**. El peso de un objeto es igual a la magnitud de la fuerza gravitacional ejercida sobre el objeto y varía con la posición (véase la sección 5.5). Por ejemplo, una persona que pesa 180 lb sobre la Tierra pesa sólo aproximadamente 30 lb sobre la Luna. Por otra parte, la masa de un objeto por dondequiera es la misma: un objeto que tiene una masa de 2 kg sobre la Tierra también tiene una masa de 2 kg sobre la Luna.

5.4 Segunda ley de Newton

La primera ley de Newton explica lo que sucede a un objeto cuando sobre él no actúan fuerzas: permanece en reposo o se mueve en línea recta con rapidez constante. La segunda ley de Newton responde la pregunta de qué acontece a un objeto que tiene una o más fuerzas que actúan sobre él.

Imagine realizar un experimento en el que empuja un bloque de masa fija a través de una superficie horizontal sin fricción. Cuando ejerce alguna fuerza horizontal $\vec{\mathbf{F}}$ sobre el bloque, éste se mueve con cierta aceleración $\vec{\mathbf{a}}$. Si aplica al doble una fuerza sobre el mismo bloque, la aceleración del bloque se duplica. Si aumenta la fuerza aplicada a $3\vec{\mathbf{F}}$, la aceleración se triplica, etcétera. A partir de tales observaciones, se concluye que **la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza que actúa sobre él:** $\vec{\mathbf{F}} \propto \vec{\mathbf{a}}$. Esta idea se introdujo por primera ocasión en la sección 2.4, cuando se discutió la dirección de la aceleración de un objeto. La magnitud de la aceleración de un objeto es inversamente proporcional a su masa, como se afirmó en la sección anterior: $|\vec{\mathbf{a}}| \propto 1/m$.

Estas observaciones experimentales se resumen en la **segunda ley de Newton**:

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.2

La fuerza es la causa de cambios en el movimiento

La fuerza *no* causa movimiento. Se puede tener movimiento en ausencia de fuerzas, como describe la primera ley de Newton. La fuerza es la causa de los *cambios* en el movimiento, como se mide por la aceleración.

> Cuando se ve desde un marco de referencia inercial, la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa:
>
> $$\vec{\mathbf{a}} \propto \frac{\sum \vec{\mathbf{F}}}{m}$$

Si se elige una constante de proporcionalidad 1, se relaciona masa, aceleración y fuerza a través del siguiente enunciado matemático de la segunda ley de Newton:[1]

Segunda ley de Newton ▶

$$\sum \vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}} \qquad \textbf{(5.2)}$$

[1] La ecuación 5.2 es válida sólo cuando la rapidez del objeto es mucho menor que la rapidez de la luz. La situación relativista se trata en el capítulo 39.

Tanto en el enunciado textual como en el matemático de la segunda ley de Newton se indicó que la aceleración se debe a la *fuerza neta* $\sum \vec{\mathbf{F}}$ que actúa sobre un objeto. La **fuerza neta** sobre un objeto es la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre el objeto. (A veces a la fuerza neta se le referirá como *fuerza total*, *fuerza resultante* o *fuerza desequilibrada*.) Al resolver un problema con la segunda ley de Newton, es imperativo determinar la fuerza neta correcta sobre un objeto. Muchas fuerzas pueden actuar sobre un objeto, pero sólo hay una aceleración.

La ecuación 5.2 es una expresión vectorial y por tanto es equivalente a tres ecuaciones componentes:

$$\sum F_x = ma_x \qquad \sum F_y = ma_y \qquad \sum F_z = ma_z \tag{5.3}$$

◀ Segunda ley de Newton: forma de componentes

Pregunta rápida 5.2 Un objeto no experimenta aceleración. ¿Cuál de los siguientes *no puede* ser cierto para el objeto? a) Una sola fuerza actúa sobre el objeto. b) No actúan fuerzas sobre el objeto. c) Sobre el objeto actúan fuerzas, pero éstas se cancelan.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.3

$m\vec{\mathbf{a}}$ no es una fuerza

La ecuación 5.2 *no* indica que el producto $m\vec{\mathbf{a}}$ sea una fuerza. Todas las fuerzas sobre un objeto se suman como vectores para generar la fuerza neta en el lado izquierdo de la ecuación. En tal caso esta fuerza neta se iguala con el producto de la masa del objeto y la aceleración que resulta de la fuerza neta. *No* incluya una "fuerza $m\vec{\mathbf{a}}$" en su análisis de las fuerzas sobre un objeto.

Pregunta rápida 5.3 Usted empuja un objeto, al inicio en reposo, a través de un piso sin fricción con una fuerza constante durante un intervalo de tiempo Δt, lo que resulta en una rapidez final de v para el objeto. Luego repite el experimento, pero con una fuerza que es el doble de grande. ¿Qué intervalo de tiempo se requiere ahora para alcanzar la misma rapidez final v? a) $4\Delta t$, b) $2\Delta t$, c) Δt, d) $\Delta t/2$, e) $\Delta t/4$.

La unidad del SI de fuerza es el **newton** (N). Una fuerza de 1 N es la fuerza que, cuando actúa sobre un objeto de 1 kg de masa, produce una aceleración de 1 m/s^2. A partir de esta definición y de la segunda ley de Newton, es claro que el newton se puede expresar en términos de las siguientes unidades fundamentales de masa, longitud y tiempo:

$$1\ \text{N} \equiv 1\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \tag{5.4}$$

◀ Definición de newton

En el sistema inglés, la unidad de fuerza es la **libra** (lb). Una fuerza de 1 lb es la fuerza que, cuando actúa sobre una masa de 1 slug,[2] produce una aceleración de 1 ft/s^2:

$$1\ \text{lb} \equiv 1\ \text{slug} \cdot \text{ft/s}^2 \tag{5.5}$$

Una aproximación conveniente es 1 N ≈ ¼ lb.

EJEMPLO 5.1 Un disco de hockey que acelera

Un disco de hockey que tiene una masa de 0.30 kg se desliza sobre la superficie horizontal sin fricción de una pista de patinaje. Dos bastones de hockey golpean el disco simultáneamente, y ejercen las fuerzas sobre el disco que se muestran en la figura 5.4. La fuerza $\vec{\mathbf{F}}_1$ tiene una magnitud de 0.5 N y la fuerza $\vec{\mathbf{F}}_2$ tiene una magnitud de 8.0 N. Determine tanto la magnitud como la dirección de la aceleración del disco.

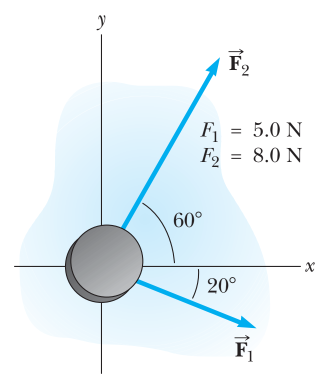


Figura 5.4 (Ejemplo 5.1) Un disco de hockey que se mueve sobre una superficie sin fricción está sujeto a dos fuerzas, $\vec{\mathbf{F}}_1$ y $\vec{\mathbf{F}}_2$.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Estudie la figura 5.4. Use su experiencia en suma vectorial del capítulo 3 y prediga la dirección aproximada del vector de fuerza neta sobre el disco. La aceleración del disco estará en la misma dirección.

Categorizar Puesto que es posible determinar una fuerza neta y se quiere una aceleración, este problema se clasifica como uno que se puede resolver aplicando la segunda ley de Newton.

[2] El *slug* es la unidad de masa en el sistema usual estadounidense y es la contraparte de la unidad del SI de *kilogramo* en dicho sistema. Puesto que la mayoría de los cálculos en el estudio de la mecánica clásica están en unidades del SI, el slug se usa rara vez en este texto.

Analizar Encuentre la componente de la fuerza neta que actúa sobre el disco en la dirección x:

$$\sum F_x = F_{1x} + F_{2x} = F_1 \cos(-20°) + F_2 \cos 60°$$
$$= (5.0\text{ N})(0.940) + (8.0\text{ N})(0.500) = 8.7\text{ N}$$

Encuentre la componente de la fuerza neta que actúa sobre el disco en la dirección y:

$$\sum F_y = F_{1y} + F_{2y} = F_1 \text{ sen}(-20°) + F_2 \text{ sen } 60°$$
$$= (5.0\text{ N})(-0.342) + (8.0\text{ N})(0.866) = 5.2\text{ N}$$

Aplique la segunda ley de Newton en forma de componentes (ecuación 5.3) para encontrar las componentes x y y de la aceleración del disco:

$$a_x = \frac{\sum F_x}{m} = \frac{8.7\text{ N}}{0.30\text{ kg}} = 29\text{ m/s}^2$$

$$a_y = \frac{\sum F_y}{m} = \frac{5.2\text{ N}}{0.30\text{ kg}} = 17\text{ m/s}^2$$

Encuentre la magnitud de la aceleración:

$$a = \sqrt{(29\text{ m/s}^2)^2 + (17\text{ m/s}^2)^2} = \boxed{34\text{ m/s}^2}$$

Localice la dirección de la aceleración en relación con el eje positivo x:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{a_y}{a_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{17}{29}\right) = \boxed{30°}$$

Finalizar Los vectores de la figura 5.4 se pueden sumar gráficamente para verificar lo razonable de la respuesta. Puesto que el vector aceleración es a lo largo de la dirección de la fuerza resultante, un dibujo que muestra el vector fuerza resultante ayuda a comprobar la validez de la respuesta. (¡Inténtelo!)

¿Qué pasaría si? Suponga que tres bastones de hockey golpean el disco simultáneamente, y dos de ellos ejercen las fuerzas que se muestran en la figura 5.4. El resultado de las tres fuerzas es que el disco de hockey *no* muestra aceleración. ¿Cuáles deben ser las componentes de la tercera fuerza?

Respuesta Si hay aceleración cero, la fuerza neta que actúa sobre el disco debe ser cero. En consecuencia, las tres fuerzas se deben cancelar. Se encontraron las componentes de la combinación de las primeras dos fuerzas. Las componentes de la tercera fuerza deben ser de igual magnitud y signo opuesto de modo que todas las componentes sumen cero. Por lo tanto, $F_{3x} = -8.7$ N, $F_{3y} = -5.2$ N.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.4

"Peso de un objeto"

Es familiar la frase cotidiana "el peso de un objeto". Sin embargo, el peso no es una propiedad inherente de un objeto; más bien, es una medida de la fuerza gravitacional entre el objeto y la Tierra (u otro planeta). Por lo tanto, el peso es una propiedad de un *sistema* de artículos: el objeto y la Tierra.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.5

El kilogramo no es una unidad de peso

Es posible que haya visto la "conversión" 1 kg = 2.2 lb. A pesar de las afirmaciones populares de peso expresadas en kilogramos, el kilogramo no es una unidad de *peso,* es una unidad de *masa.* El enunciado de conversión no es una igualdad; es una *equivalencia* que es válida sólo en la superficie de la Tierra.

5.5 Fuerza gravitacional y peso

Todos los objetos son atraídos hacia la Tierra. La fuerza de atracción que ejerce la Tierra sobre un objeto se llama **fuerza gravitacional** $\vec{\mathbf{F}}_g$. Esta fuerza se dirige hacia el centro de la Tierra[3] y su magnitud se llama **peso** del objeto.

En la sección 2.6 se vio que un objeto en caída libre experimenta una aceleración $\vec{\mathbf{g}}$ que actúa hacia el centro de la Tierra. Al aplicar la segunda ley de Newton $\sum \vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$ a un objeto en caída libre de masa m, con $\vec{\mathbf{a}} = \vec{\mathbf{g}}$ y $\sum \vec{\mathbf{F}} = \vec{\mathbf{F}}_g$ se obtiene

$$\vec{\mathbf{F}}_g = m\vec{\mathbf{g}}$$

Por lo tanto, el peso de un objeto, al definirse como la magnitud de $\vec{\mathbf{F}}_g$ es igual a mg:

$$F_g = mg \tag{5.6}$$

Puesto que depende de g, el peso varía con la ubicación geográfica. Dado que g disminuye a medida que crece la distancia al centro de la Tierra, los objetos pesan menos a mayores altitudes que a nivel del mar. Por ejemplo, un bloque de ladrillos de 1 000 kg utilizado en la construcción del Empire State en Nueva York pesaba 9 800 N a nivel de la calle, pero pesaba alrededor de 1 N menos cuando se levantó del nivel de la acera hasta lo alto del edificio. Como otro ejemplo, suponga que un estudiante tiene una masa de 70.0 kg. El peso del estudiante en una ubicación donde $g = 9.80$ m/s^2 es 686 N (aproximadamente 150 lb). Sin embargo, en lo alto de una montaña, donde $g = 9.77$ m/s^2, el

[3] Este enunciado ignora que la distribución de masa de la Tierra no es perfectamente esférica.

peso del estudiante sólo es 684 N. En tal caso, si quiere perder peso sin someterse a dieta, ¡ascienda una montaña o pésese a 30 000 ft durante el vuelo de un avión!

La ecuación 5.6 cuantifica la fuerza gravitacional sobre el objeto, pero advierta que esta ecuación no requiere que el objeto se mueva. Incluso para un objeto fijo o para un objeto sobre el que actúan varias fuerzas, la ecuación 5.6 se puede aplicar para calcular la magnitud de la fuerza gravitacional. El resultado es un cambio sutil en la interpretación de m en la ecuación. La masa m en la ecuación 5.6 establece la intensidad de la atracción gravitacional entre el objeto y la Tierra. Este papel es por completo diferente del descrito antes para la masa: medir la resistencia al cambio en movimiento como respuesta a una fuerza externa. Por ende, la m en la ecuación 5.6 se llama **masa gravitacional**. Aun cuando esta cantidad sea diferente en comportamiento de la masa inercial, una de las conclusiones experimentales de la dinámica newtoniana es que la masa gravitacional y la masa inercial tienen el mismo valor.

Aunque esta discusión se enfocó en la fuerza gravitacional sobre un objeto debida a la Tierra, el concepto generalmente es válido en cualquier planeta. El valor de g variará de un planeta a otro, pero la magnitud de la fuerza gravitacional siempre será conocida por el valor de mg.

NASA

La unidad de sustentación de vida que lleva en la espalda el astronauta Edwin Aldrin pesaba 300 lb en la Tierra. Durante su entrenamiento, usó una mochila de 50 lb. Aunque esta estrategia simuló efectivamente el peso reducido que la unidad tendría en la Luna, no imitó correctamente la masa invariable. Fue difícil acelerar la unidad (acaso al saltar o dar vuelta súbitamente) en la Luna como en la Tierra.

Pregunta rápida 5.4 Suponga que habla por un teléfono interplanetario a un amigo que vive en la Luna. Él le dice que acaba de ganar un newton de oro en un concurso. Con excitación, ¡usted le dice que entró a la versión terrícola del mismo concurso y que también ganó un newton de oro! ¿Quién es más rico? a) Usted. b) Su amigo. c) Ambos son igualmente ricos.

EJEMPLO CONCEPTUAL 5.2 **¿Cuánto pesa en un elevador?**

Es muy que probable que usted haya estado en un elevador que acelera hacia arriba mientras se mueve a pisos superiores. En este caso, se siente más pesado. De hecho, si se para en una báscula en ese momento, la báscula mide una fuerza que tiene una magnitud mayor que su peso. Por lo tanto, tiene evidencia sensorial y medida que lo lleva a creer que es más pesado en esta situación. ¿*Es usted* más pesado?

SOLUCIÓN

No; su peso no cambia. Sus experiencias se deben al hecho de que está en un marco de referencia no inercial. Para proporcionar la aceleración ascendente, el suelo o la báscula deben ejercer sobre sus pies una fuerza hacia arriba que sea mayor en magnitud que su peso. Esta fuerza más grande que siente es la que interpreta como sentirse más pesado. La báscula lee esta fuerza ascendente, no su peso, y por eso su lectura aumenta.

5.6 Tercera ley de Newton

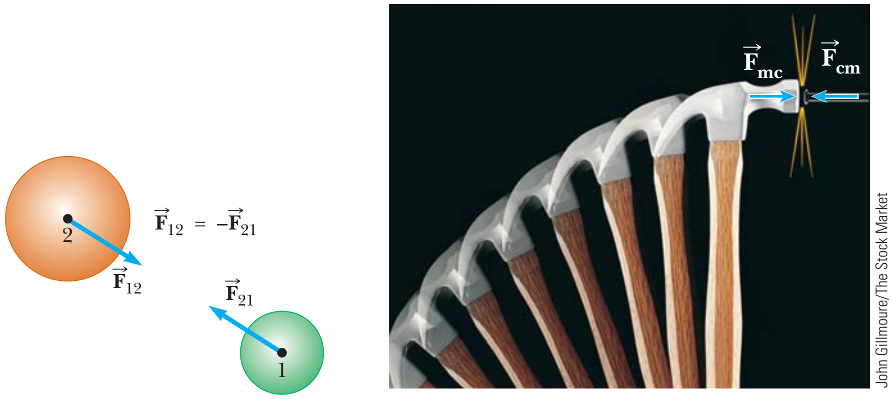
Si usted presiona contra una esquina de este libro con la yema de los dedos, el libro lo empuja de vuelta y forma una pequeña marca en su piel. Si empuja más fuerte, el libro hace lo mismo y la marca en su piel es un poco más profunda. Esta simple actividad ilustra que las fuerzas son *interacciones* entre dos objetos: cuando su dedo empuja sobre el libro, el libro empuja de vuelta sobre su dedo. Este importante principio se conoce como **tercera ley de Newton**:

◀ Tercera ley de Newton

Si dos objetos interactúan, la fuerza $\vec{\mathbf{F}}_{12}$ que ejerce el objeto 1 sobre el objeto 2 es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza $\vec{\mathbf{F}}_{21}$ que ejerce el objeto 2 sobre el objeto 1:

$$\vec{\mathbf{F}}_{12} = -\vec{\mathbf{F}}_{21} \tag{5.7}$$

Cuando sea importante designar fuerzas como interacciones entre dos objetos, se usará esta notación de subíndices, donde $\vec{\mathbf{F}}_{ab}$ significa "la fuerza que se ejerce *por* a *sobre* b": la tercera ley se ilustra en la figura 5.5a. La fuerza que el objeto 1 ejerce sobre el objeto 2 se llama popularmente *fuerza de acción*, y la fuerza del objeto 2 sobre el objeto 1 se llama



a) b)

Figura 5.5 Tercera ley de Newton. a) La fuerza $\vec{\mathbf{F}}_{12}$ que ejerce el objeto 1 sobre el objeto 2 es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza $\vec{\mathbf{F}}_{21}$ que ejerce el objeto 2 sobre el objeto 1. b) La fuerza $\vec{\mathbf{F}}_{mc}$ que ejerce el martillo sobre el clavo es igual en magnitud y opuesta a la fuerza $\vec{\mathbf{F}}_{cm}$ que ejerce el clavo sobre el martillo.

fuerza de reacción. Estos términos en cursivas no son términos científicos; además, cualquier fuerza se puede etiquetar como fuerza de acción o reacción. Estos términos se usarán por conveniencia. **En todos los casos, las fuerzas de acción y reacción actúan sobre objetos *diferentes* y deben ser del mismo tipo (gravitacional, eléctrica, etcétera).** Por ejemplo, la fuerza que actúa sobre un proyectil en caída libre es la fuerza gravitacional que ejerce la Tierra sobre el proyectil $\vec{\mathbf{F}}_g = \vec{\mathbf{F}}_{Tp}$ (T = Tierra, p = proyectil), y la magnitud de esta fuerza es mg. La reacción a esta fuerza es la fuerza gravitacional que ejerce el proyectil sobre la Tierra $\vec{\mathbf{F}}_{pE} = -\vec{\mathbf{F}}_{Tp}$. La fuerza de reacción $\vec{\mathbf{F}}_{pT}$ debe acelerar a la Tierra hacia el proyectil tal como la fuerza de acción $\vec{\mathbf{F}}_{Tp}$ acelera al proyectil hacia la Tierra. No obstante, puesto que la Tierra tiene una masa tan grande, su aceleración debida a esta fuerza de reacción es despreciablemente pequeña.

Otro ejemplo de la tercera ley de Newton se muestra en la figura 5.5b. La fuerza $\vec{\mathbf{F}}_{mc}$ que ejerce el martillo sobre el clavo es igual en magnitud y opuesta a la fuerza $\vec{\mathbf{F}}_{cm}$ que ejerce el clavo sobre el martillo. Esta última fuerza detiene el movimiento hacia adelante del martillo cuando golpea el clavo.

Considere un monitor de computadora en reposo sobre una mesa, como en la figura 5.6a. La fuerza de reacción a la fuerza gravitacional $\vec{\mathbf{F}}_g = \vec{\mathbf{F}}_{Tm}$ sobre el monitor es la fuerza $\vec{\mathbf{F}}_{mT} = -\vec{\mathbf{F}}_{Tm}$ que ejerce el monitor sobre la Tierra. El monitor no acelera porque lo sostiene la mesa. La mesa ejerce sobre el monitor una fuerza hacia arriba $\vec{\mathbf{n}} = \vec{\mathbf{F}}_{mm}$ llamada **fuerza normal**.[4] Esta fuerza, que evita que el monitor caiga a través de la mesa, puede tener cualquier valor necesario, hasta el punto de romper la mesa. Puesto que el monitor tiene aceleración cero, la segunda ley de Newton aplicada al monitor produce $\sum \vec{\mathbf{F}} = \vec{\mathbf{n}} + m\vec{\mathbf{g}} = 0$, de modo que $n\hat{\mathbf{j}} - mg\hat{\mathbf{j}} = 0$, o $n = mg$. La fuerza normal equilibra la fuerza gravitacional sobre el monitor, de modo que la fuerza neta sobre el monitor es cero. La fuerza de reacción a $\vec{\mathbf{n}}$ es la fuerza que ejerce el monitor hacia abajo sobre la mesa, $\vec{\mathbf{F}}_{mm} = -\vec{\mathbf{F}}_{mm} = -\vec{\mathbf{n}}$.

Fuerza normal ▶

Observe que las fuerzas que actúan sobre el monitor son $\vec{\mathbf{F}}_g$ y $\vec{\mathbf{n}}$, como se muestra en la figura 5.6b. Las dos fuerzas $\vec{\mathbf{F}}_{mT}$ y $\vec{\mathbf{F}}_{mm}$ se ejercen sobre objetos distintos del monitor.

La figura 5.6 ilustra un paso de suma importancia en la resolución de problemas que involucran fuerzas. La figura 5.6a muestra muchas de las fuerzas actuantes en la situación: las que actúan sobre el monitor, una que actúa sobre la mesa y otra que actúa sobre la Tierra. La figura 5.6b, en contraste, muestra sólo las fuerzas que actúan sobre *un objeto*, el monitor. Esta importante representación pictórica de la figura 5.6b se llama **diagrama de cuerpo libre**. Cuando se analiza un objeto sujeto a fuerzas, se tiene interés en la fuerza neta que actúa sobre un objeto, que se representarán como partícula. En consecuencia, un diagrama de cuerpo libre ayuda a aislar sólo aquellas fuerzas sobre el objeto y elimina

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.6

n* no siempre es igual a *mg

En la situación que se muestra en la figura 5.6 y en muchas otras, se encuentra que $n = mg$ (la fuerza normal tiene la misma magnitud que la fuerza gravitacional). Sin embargo, este resultado generalmente *no* es cierto. Si un objeto está en un plano inclinado, si hay fuerzas aplicadas con componentes verticales o si hay una aceleración vertical del sistema, por lo tanto $n \neq mg$. *Siempre* aplique la segunda ley de Newton para encontrar la relación entre n y mg.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.7

Tercera ley de Newton

Recuerde que las fuerzas de acción y reacción de la tercera ley de Newton actúan sobre objetos *diferentes*. Por ejemplo, en la figura 5.6, $\vec{\mathbf{n}} = \vec{\mathbf{F}}_{mm} = -m\vec{\mathbf{g}} = -\vec{\mathbf{F}}_{Tm}$. Las fuerzas $\vec{\mathbf{n}}$ y $m\vec{\mathbf{g}}$ son iguales en magnitud y opuestas en dirección, pero no representan un par acción-reacción porque ambas fuerzas actúan sobre el *mismo* objeto, el monitor.

[4] *Normal* en este contexto significa *perpendicular*.

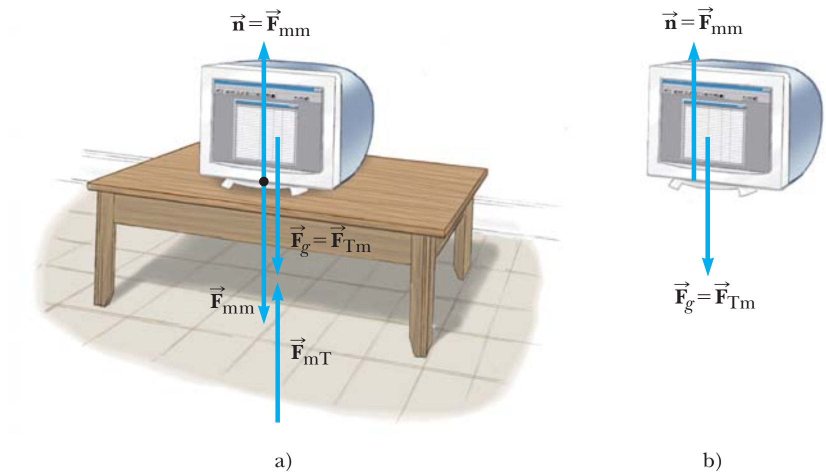


Figura 5.6 a) Cuando un monitor de computadora está en reposo sobre una mesa, las fuerzas que actúan sobre el monitor son la fuerza normal $\vec{n}$ y la fuerza gravitacional $\vec{F}_g$. La reacción a $\vec{n}$ es la fuerza $\vec{F}_{mm}$ que ejerce el monitor sobre la mesa. La reacción a $\vec{F}_g$ es la fuerza $\vec{F}_{Tm}$ que ejerce el monitor sobre la Tierra. b) Diagrama de cuerpo libre para el monitor.

las otras fuerzas del análisis. Es posible simplificar este diagrama todavía más al representar el objeto (como el monitor) como una partícula al dibujar simplemente un punto.

Pregunta rápida 5.5 **i)** Si una mosca choca contra el parabrisas de un autobús moviéndose rápidamente, ¿cuál de los dos experimenta una fuerza de impacto con mayor magnitud? a) La mosca. b) El autobús. c) Ambos experimentan la misma fuerza. **ii)** ¿Cuál de los dos experimenta mayor aceleración? a) La mosca. b) El autobús. c) Ambos experimentan la misma aceleración.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.8
Diagrama de cuerpo libre

La etapa *más importante* en la resolución de un problema que utiliza las leyes de Newton es dibujar un bosquejo adecuado, el diagrama de cuerpo libre. Asegúrese de dibujar sólo aquellas fuerzas que actúan sobre el objeto que aísla. Dibuje *todas* las fuerzas que actúan sobre el objeto, incluida cualesquier fuerza de campo, como la fuerza gravitacional.

EJEMPLO CONCEPTUAL 5.3 Tú me empujas y yo te empujo

Un hombre grande y un niño pequeño están de pie, uno frente al otro sobre hielo sin fricción. Juntan sus manos y se empujan mutuamente de modo que se separan.

A) ¿Quién se aleja con mayor rapidez?

SOLUCIÓN

Esta situación es similar a la que se vio en la pregunta rápida 5.5. De acuerdo con la tercera ley de Newton, la fuerza que ejerce el hombre sobre el niño y la fuerza que ejerce el niño sobre el hombre son un par de fuerzas de la tercera ley, de modo que deben ser iguales en magnitud. (Una báscula colocada entre sus manos leería lo mismo, sin importar de cuál lado esté.) En consecuencia, el niño, que tiene la masa más pequeña, experimenta mayor aceleración. Ambos individuos aceleran durante la misma cantidad de tiempo, pero la mayor aceleración del niño en este intervalo de tiempo resulta en que su movimiento de alejamiento de la interacción es con mayor rapidez.

B) ¿Quién se aleja más mientras sus manos están en contacto?

SOLUCIÓN

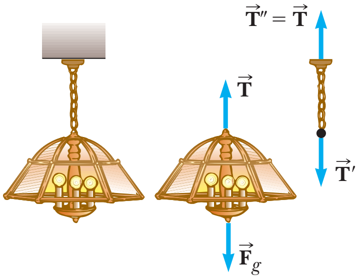
Puesto que el niño tiene la mayor aceleración y en consecuencia la mayor velocidad promedio, se aleja más que el hombre durante el intervalo de tiempo mientras que sus manos están en contacto.

5.7 Algunas aplicaciones de las leyes de Newton

En esta sección se discuten dos modelos de análisis para resolver problemas en que los objetos están en equilibrio ($\vec{a} = 0$) o aceleran a lo largo de una línea recta bajo la acción de fuerzas externas constantes. Recuerde que, **cuando las leyes de Newton se aplican a un objeto, se tiene interés sólo en las fuerzas externas que actúan sobre el objeto**. Si se representan los objetos como partículas, no necesita preocuparse por el movimiento rota-

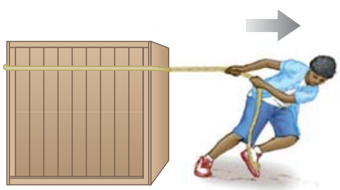
©John Elk III/Stock, Boston,/PictureQuest

Los escaladores en reposo están en equilibrio y para su seguridad dependen de las fuerzas de tensión sobre las cuerdas.

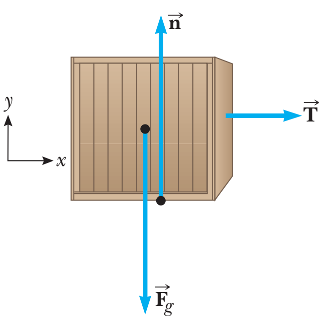


a) b) c)

Figura 5.7 a) Una lámpara suspendida del techo mediante una cadena de masa despreciable. b) Las fuerzas que actúan sobre la lámpara son la fuerza gravitacional $\vec{\mathbf{F}}_g$ y la fuerza $\vec{\mathbf{T}}$ que ejerce la cadena. c) Las fuerzas que actúan sobre la cadena son la fuerza $\vec{\mathbf{T}}'$ que ejerce la lámpara y la fuerza $\vec{\mathbf{T}}''$ que ejerce el techo.



a)



b)

Figura 5.8 a) Una caja que se jala hacia la derecha sobre una superficie sin fricción. b) Diagrama de cuerpo libre que representa las fuerzas externas que actúan sobre la caja.

cional. Por ahora, también se desprecian los efectos de la fricción en aquellos problemas que involucran movimiento, que es equivalente a afirmar que la superficie *no tiene fricción*. (La fuerza de fricción se discute en la sección 5.8.)

Por lo general se ignora la masa de cualquier soga, cuerda o cable involucrado. En esta aproximación, la magnitud de la fuerza que ejerce cualquier elemento de la soga sobre el elemento adyacente es la misma para todos los elementos a lo largo de la soga. En los enunciados de problema, los términos sinónimos *ligero* o *de masa despreciable* se usan para indicar que una masa se ignorará cuando trabaje los problemas. Cuando una soga unida a un objeto jala sobre el objeto, la soga ejerce una fuerza $\vec{\mathbf{T}}$ sobre el objeto en una dirección que se aleja del objeto, paralela a la soga. La magnitud T de dicha fuerza se llama **tensión** en la soga. Puesto que es la magnitud de una cantidad vectorial, la tensión es una cantidad escalar.

Partícula en equilibrio

Si la aceleración de un objeto representado como partícula es cero, el objeto se considera con el modelo de **partícula en equilibrio**. En este modelo, la fuerza neta sobre el objeto es cero:

$$\sum \vec{\mathbf{F}} = 0 \qquad \textbf{(5.8)}$$

Considere una lámpara suspendida de una cadena ligera unida al techo, como en la figura 5.7a. El diagrama de cuerpo libre para la lámpara (figura 5.7b) muestra que las fuerzas que actúan sobre la lámpara son la fuerza gravitacional hacia abajo $\vec{\mathbf{F}}_g$ y la fuerza hacia arriba $\vec{\mathbf{T}}$ que ejerce la cadena. Puesto que no hay fuerzas en la dirección x, $\Sigma F_x = 0$ no proporciona información útil. La condición $\Sigma F_y = 0$ produce

$$\sum F_y = T - F_g = 0 \quad \text{o} \quad T = F_g$$

De nuevo, advierta que $\vec{\mathbf{T}}$ y $\vec{\mathbf{F}}_g$ *no* son un par acción–reacción porque actúan sobre el mismo objeto, la lámpara. La fuerza de reacción a $\vec{\mathbf{T}}$ es $\vec{\mathbf{T}}'$, la fuerza hacia abajo que ejerce la lámpara sobre la cadena, como se muestra en la figura 5.7c. Dado que la cadena es una partícula en equilibrio, el techo debe ejercer sobre la cadena una fuerza $\vec{\mathbf{T}}''$ que es igual en magnitud a la magnitud de $\vec{\mathbf{T}}'$ y apunta en la dirección opuesta.

Partícula bajo una fuerza neta

Si un objeto experimenta una aceleración, su movimiento se puede analizar con el modelo de **partícula bajo una fuerza neta**. La ecuación apropiada para este modelo es la segunda ley de Newton, ecuación 5.2. Considere una caja que se jala hacia la derecha sobre una superficie horizontal sin fricción, como en la figura 5.8a. Suponga que quiere encontrar la aceleración de la caja y la fuerza que el suelo ejerce sobre ella. Las fuerzas que actúan sobre la caja se ilustran en el diagrama de cuerpo libre de la figura 5.8b. Note que la fuerza horizontal $\vec{\mathbf{T}}$ que se aplica a la caja actúa a través de la soga. La magnitud de $\vec{\mathbf{T}}$ es igual a la tensión en la soga. Además de la fuerza $\vec{\mathbf{T}}$, el diagrama de cuerpo libre para la caja incluye la fuerza gravitacional $\vec{\mathbf{F}}_g$ y la fuerza normal $\vec{\mathbf{n}}$ que ejerce el suelo sobre la caja.

Ahora se puede aplicar la segunda ley de Newton en forma de componentes para la caja. La única fuerza que actúa en la dirección x es $\vec{\mathbf{T}}$. Al aplicar $\Sigma F_x = ma_x$ al movimiento horizontal se obtiene

$$\sum F_x = T = ma_x \quad \text{o} \quad a_x = \frac{T}{m}$$

En la dirección y no se presenta aceleración porque la caja sólo se mueve horizontalmente. En consecuencia, se usa el modelo de partícula en equilibrio en la dirección y. Al aplicar la componente y de la ecuación 5.8 se produce

$$\sum F_y = n + (-F_g) = 0 \quad \text{o} \quad n = F_g$$

Esto es, la fuerza normal tiene la misma magnitud que la fuerza gravitacional pero actúa en la dirección opuesta.

Si $\vec{\mathbf{T}}$ es una fuerza constante, la aceleración $a_x = T/m$ también es constante. Por tanto, la caja también se representa como una partícula bajo aceleración constante en la dirección x, y se puede aplicar la ecuación de cinemática del capítulo 2 para obtener la posición x y velocidad v_x de la caja como funciones del tiempo.

En la situación recién descrita, la magnitud de la fuerza normal $\vec{\mathbf{n}}$ es igual a la magnitud de $\vec{\mathbf{F}}_g$, pero esto no siempre es el caso. Por ejemplo, suponga que un libro se encuentra sobre una mesa y usted empuja hacia abajo sobre el libro con una fuerza $\vec{\mathbf{F}}$, como en la figura 5.9. Ya que el libro está en reposo y debido a eso no acelera, $\Sigma F_y = 0$, lo que da $n - F_g - F = 0$ o $n = F_g + F$. En esta situación, la fuerza normal es *mayor* que la fuerza gravitacional. Más adelante se presentan otros ejemplos en los que $n \neq F_g$.

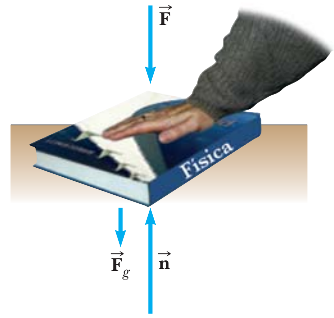


Figura 5.9 Cuando una fuerza $\vec{\mathbf{F}}$ empuja verticalmente hacia abajo sobre otro objeto, la fuerza normal $\vec{\mathbf{n}}$ sobre el objeto es mayor que la fuerza gravitacional: $n = F_g + F$.

ESTRATEGIA PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS **Aplicación de las leyes de Newton**

Se propone el procedimiento que sigue cuando se relaciona con problemas que involucran leyes de Newton:

1. *Conceptualizar.* Dibuje un diagrama simple y nítido del sistema. El diagrama ayuda a constituir la representación mental. Para cada objeto en el sistema establecer ejes coordenados convenientes.
2. *Categorizar.* Si un componente de aceleración para un objeto es cero, el objeto se representa como una partícula en equilibrio en esta dirección y $\Sigma F = 0$. Si no, el objeto se representa como una partícula bajo una fuerza neta en esta dirección y $\Sigma F = ma$.
3. *Analizar.* Aísle el objeto cuyo movimiento se analizará. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para este objeto. Para sistemas que contengan más de un objeto, dibuje *por separado* diagramas de cuerpo libre para cada objeto. En el diagrama de cuerpo libre *no* incluya fuerzas que el objeto ejerce sobre su entorno.

   Encuentre las componentes de las fuerzas a lo largo de los ejes coordenados. Aplique el modelo apropiado de la etapa Categorizar para cada dirección. Compruebe sus dimensiones para asegurarse de que todos los términos tienen unidades de fuerza.

   Resuelva las ecuaciones por componentes para las incógnitas. Recuerde que debe tener tantas ecuaciones independientes como incógnitas para obtener una solución completa.
4. *Finalizar.* Confirme que sus resultados sean consistentes con el diagrama de cuerpo libre. También compruebe las predicciones de sus soluciones para valores extremos de las variables. Al hacerlo, con frecuencia puede detectar errores en sus resultados.

EJEMPLO 5.4 Un semáforo en reposo

Un semáforo que pesa 122 N cuelga de un cable unido a otros dos cables sostenidos a un soporte como en la figura 5.10a. Los cables superiores forman ángulos de 37.0° y 53.0° con la horizontal. Estos cables superiores no son tan fuertes como el cable vertical y se romperán si la tensión en ellos supera los 100 N. ¿El semáforo permanecerá colgado en esta situación, o alguno de los cables se romperá?

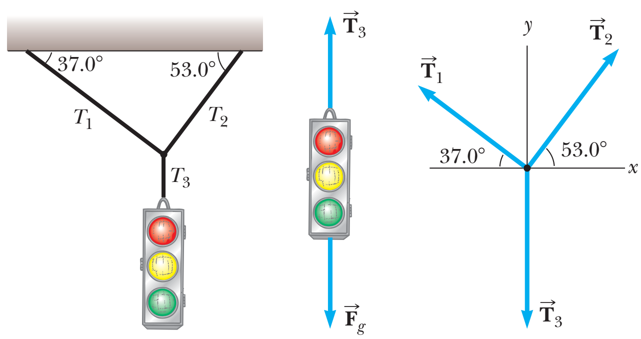


Figura 5.10 (Ejemplo 5.4) a) Un semáforo suspendido por cables. b) Diagrama de cuerpo libre del semáforo. c) Diagrama de cuerpo libre del nudo donde se juntan los tres cables.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Examine el dibujo de la figura 5.10a. Suponga que los cables no se rompen y que nada se mueve.

Categorizar Si nada se mueve, ninguna parte del sistema acelera. Ahora puede representar el semáforo como una partícula en equilibrio sobre la que se ejerce una fuerza neta de cero. De igual modo, la fuerza neta sobre el nudo (figura 5.10c) es cero.

Analizar Construya dos diagramas de cuerpo libre: uno para el semáforo, que se muestra en la figura 5.10b, y otro para el nudo que mantiene juntos los tres cables, que se muestra en la figura 5.10c. Este nudo es un objeto conveniente a elegir porque todas las fuerzas de interés actúan a lo largo de líneas que pasan a través del nudo.

Aplique la ecuación 5.8 para el semáforo en la dirección y:

$$\sum F_y = 0 \quad \rightarrow \quad T_3 - F_g = 0$$

$$T_3 = F_g = 122 \text{ N}$$

Elija los ejes coordenados como se muestra en la figura 5.10c y descomponer en sus componentes las fuerzas que actúan en el nudo:

Fuerza	Componente x	Componente y
$\vec{\mathbf{T}}_1$	$-T_1 \cos 37.0°$	T_1 sen $37.0°$
$\vec{\mathbf{T}}_2$	$T_2 \cos 53.0°$	T_2 sen $53.0°$
$\vec{\mathbf{T}}_3$	0	-122 N

Aplique el modelo de partícula en equilibrio al nudo:

$$\text{1)} \quad \sum F_x = -T_1 \cos 37.0° + T_2 \cos 53.0° = 0$$

$$\text{2)} \quad \sum F_y = T_1 \operatorname{sen} 37.0° + T_2 \operatorname{sen} 53.0° + (-122 \text{ N}) = 0$$

La ecuación 1) muestra que las componentes horizontales de $\vec{\mathbf{T}}_1$ y $\vec{\mathbf{T}}_2$ deben ser iguales en magnitud, y la ecuación 2) indica que la suma de las componentes verticales de $\vec{\mathbf{T}}_1$ y $\vec{\mathbf{T}}_2$ deben equilibrar la fuerza hacia abajo $\vec{\mathbf{T}}_3$, que es igual en magnitud al peso del semáforo.

Resuelva la ecuación 1) para T_2 en términos de T_1:

$$\text{3)} \quad T_2 = T_1\left(\frac{\cos 37.0°}{\cos 53.0°}\right) = 1.33T_1$$

Sustituya este valor para T_2 en la ecuación 2):

$$T_1 \operatorname{sen} 37.0° + (1.33T_1)(\operatorname{sen} 53.0°) - 122 \text{ N} = 0$$

$$T_1 = 73.4 \text{ N}$$

$$T_2 = 1.33T_1 = 97.4 \text{ N}$$

Ambos valores son menores que 100 N (apenas para T_2), de modo que los cables no se romperán.

Finalizar Finalice este problema al imaginar un cambio en el sistema, como el siguiente **¿Qué pasaría si?**

¿Qué pasaría si? Suponga que los dos ángulos de la figura 5.10a son iguales. ¿Cuál sería la correspondencia entre T_1 y T_2?

Respuesta Se puede argumentar a partir de la simetría del problema que las dos tensiones T_1 y T_2 serían iguales entre sí. Matemáticamente, si los ángulos iguales se llaman θ, la ecuación 3) se convierte en

$$T_2 = T_1\left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta}\right) = T_1$$

que también dice que las tensiones son iguales. Sin saber el valor específico de θ, no se pueden encontrar los valores de T_1 y T_2. Sin embargo, las tensiones serán iguales entre sí, sin importar el valor de θ.

EJEMPLO CONCEPTUAL 5.5 Fuerzas entre vagones en un tren

Los vagones de tren se conectan mediante *enganches,* que están bajo tensión conforme la locomotora jala el tren. Imagine que usted está en un tren que aumenta velocidad con aceleración constante. A medida que se mueve a lo largo del tren desde la locomotora hacia el último vagón, midiendo la tensión en cada conjunto de enganches, ¿la tensión aumenta, disminuye o permanece igual? Cuando el ingeniero aplica los frenos, los enganches están bajo compresión. ¿Cómo varía esta fuerza de compresión desde la locomotora hasta el último vagón? (Suponga que sólo se aplican los frenos en las ruedas de la máquina.)

SOLUCIÓN

Conforme el tren aumenta la velocidad, la tensión disminuye desde el frente del tren hasta la parte trasera. El enganche entre la locomotora y el primer vagón debe aplicar suficiente fuerza para acelerar el resto de los vagones. A medida que se mueve a lo largo del tren, cada enganche acelera menos masa detrás de él. El último enganche tiene que acelerar sólo al último vagón y por lo tanto está bajo menos tensión.

Cuando se aplican los frenos, la fuerza nuevamente disminuye desde el frente a la parte trasera. El enganche que conecta la locomotora con el primer vagón debe aplicar una gran fuerza para frenar el resto de los vagones, pero el enganche final debe aplicar una fuerza suficientemente grande para frenar sólo al último vagón.

EJEMPLO 5.6 El auto que escapa

Un automóvil de masa m está sobre un camino cubierto con hielo inclinada en un ángulo θ, como en la figura 5.11a.

A) Encuentre la aceleración del automóvil, si supone que la pista no tiene fricción.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Use la figura 5.11a para formar ideas de la situación. A partir de la experiencia cotidiana, se sabe que un automóvil sobre un plano inclinado cubierto con hielo acelerará hacia abajo por el plano. (Lo mismo le sucede a un automóvil sin frenos en una colina.)

Categorizar El automóvil se clasifica como una partícula bajo una fuerza neta. Además, este problema pertenece a una categoría de problemas muy común en la que un objeto se mueve bajo la influencia de la gravedad sobre un plano inclinado.

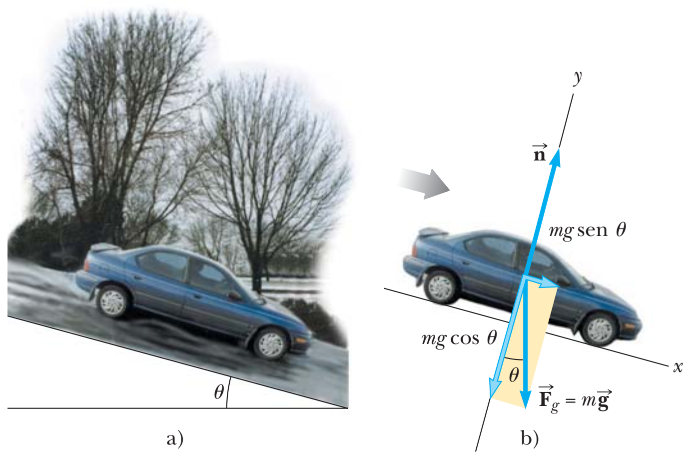


Figura 5.11 (Ejemplo 5.6) a) Un automóvil de masa m sobre un plano inclinado sin fricción. b) Diagrama de cuerpo libre para el automóvil.

Analizar La figura 5.11b muestra el diagrama de cuerpo libre del automóvil. Las únicas fuerzas que actúan sobre el automóvil son la fuerza normal $\vec{\mathbf{n}}$ que ejerce el plano inclinado, que actúa perpendicular al plano, y la fuerza gravitacional $\vec{\mathbf{F}}_g = m\vec{\mathbf{g}}$, que actúa verticalmente hacia abajo. Para problemas que involucran planos inclinados, es conveniente elegir los ejes coordenados con x a lo largo del plano y y perpendicular a él, como en la figura 5.11b. (Es posible, aunque inconveniente, resolver el problema con ejes horizontal y vertical "normal". Tal vez quiera intentarlo, sólo para practicar.) Con estos ejes, represente la fuerza gravitacional mediante una componente de magnitud mg sen θ a lo largo del eje x positivo y otra de magnitud mg cos θ a lo largo del eje y negativo.

Al aplicar la segunda ley de Newton al automóvil en forma de componentes, y notar que $a_y = 0$:

$$1)\quad \sum F_x = mg \operatorname{sen} \theta = ma_x$$

$$2)\quad \sum F_y = n - mg\cos\theta = 0$$

Resuelva la ecuación 1) para a_x:

$$3)\quad a_x = \boxed{g \operatorname{sen} \theta}$$

Finalizar La elección de ejes que resulta en el automóvil se representa como una partícula bajo una fuerza neta en la dirección x y una partícula en equilibrio en la dirección y. Además, ¡la componente aceleración a_x es independiente de la masa del automóvil! Sólo depende del ángulo de inclinación y de g.

De la ecuación 2) se concluye que la componente de $\vec{\mathbf{F}}_g$ perpendicular al plano se equilibra mediante la fuerza normal; esto es, $n = mg\cos\theta$. Esta situación es otro caso en el que la fuerza normal *no* es igual en magnitud al peso del objeto.

B) Considere que el automóvil se libera desde el reposo en lo alto del plano y que la distancia desde la defensa frontal del automóvil hasta el fondo del plano inclinado es d. ¿Cuánto tarda la defensa frontal en llegar al fondo de la colina, y cuál es la rapidez del automóvil cuando llega ahí?

SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine que el automóvil se desliza por la colina y que usa un cronómetro para medir todo el intervalo de tiempo hasta que llega al fondo.

Categorizar Esta parte del problema pertenece a cinemática más que a dinámica, y la ecuación 3) muestra que la aceleración a_x es constante. Por lo tanto, debe clasificar al automóvil en este inciso del problema como una partícula bajo aceleración constante.

Analizar Al definir la posición inicial de la defensa frontal como $x_i = 0$ y su posición final como $x_f = d$, y reconocer que $v_{xi} = 0$, aplique la ecuación 2.16, $x_f = x_i + v_{xi}t + \frac{1}{2}a_x t^2$:

$$d = \tfrac{1}{2}a_x t^2$$

Resuelva para t:

$$4)\quad t = \sqrt{\frac{2d}{a_x}} = \boxed{\sqrt{\frac{2d}{g\,\text{sen}\,\theta}}}$$

Aplique la ecuación 2.17, con $v_{xi} = 0$ para encontrar la velocidad final del automóvil:

$$v_{xf}^{\,2} = 2a_x d$$

$$5)\quad v_{xf} = \sqrt{2a_x d} = \boxed{\sqrt{2gd\,\text{sen}\,\theta}}$$

Finalizar De las ecuaciones 4) y 5) se ve que el tiempo t al que el automóvil alcanza el fondo y su rapidez final v_{xf} son independientes de la masa del automóvil, como lo fue su aceleración. Note que, en este ejemplo, se combinaron técnicas del capítulo 2 con nuevas técnicas de este capítulo. A medida que aprenda más técnicas en capítulos posteriores, este proceso de combinar información proveniente de varias partes del libro ocurrirá con más frecuencia. En estos casos, use la *Estrategia general para resolver problemas* para auxiliarse a identificar qué modelos de análisis necesitará.

¿Qué pasaría si? ¿En qué problema resuelto anteriormente se convierte esta situación si $\theta = 90°$?

Respuesta Imagine que θ va a 90° en la figura 5.11. El plano inclinado se vuelve vertical, ¡y el automóvil es un objeto en caída libre! La ecuación 3) se convierte en

$$a_x = g\,\text{sen}\,\theta = g\,\text{sen}\,90° = g$$

que de hecho es la aceleración de caída libre. (Se encuentra $a_x = g$ en lugar de $a_x = -g$ porque la x positiva se eligió hacia abajo en la figura 5.11.) Note también que la condición $n = mg\cos\theta$ produce $n = mg\cos 90° = 0$. Esto es consistente con el automóvil que cae *junto al* plano vertical, en cuyo caso no hay fuerza de contacto entre el automóvil y el plano.

EJEMPLO 5.7 Un bloque empuja a otro

Dos bloques de masas m_1 y m_2, con $m_1 > m_2$, se colocan en contacto mutuo sobre una superficie horizontal sin fricción, como en la figura 5.12a. Una fuerza horizontal constante $\vec{\mathbf{F}}$ se aplica a m_1 como se muestra.

A) Encuentre la magnitud de la aceleración del sistema.

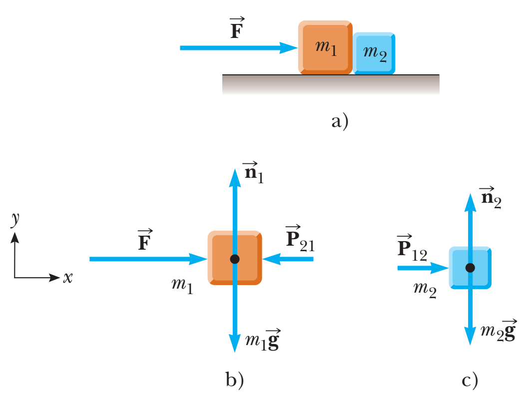


Figura 5.12 (Ejemplo 5.7). a) Se aplica una fuerza se a un bloque de masa m_1, que empuja a un segundo bloque de masa m_2. b) Diagrama de cuerpo libre para m_1. c) Diagrama de cuerpo libre para m_2.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Elabore ideas de la situación mediante la figura 5.12a y observe que ambos bloques deben experimentar la *misma* aceleración porque están en contacto mutuo y permanecen en contacto por todo el movimiento.

Categorizar Este problema se clasifica como una partícula bajo una fuerza neta porque se aplica una fuerza a un sistema de bloques y se busca la aceleración del sistema.

Analizar Primero represente la combinación de los dos bloques como una sola partícula. Aplique la segunda ley de Newton a la combinación:

$$\sum F_x = F = (m_1 + m_2)a_x$$

$$1)\quad a_x = \boxed{\frac{F}{m_1 + m_2}}$$

Finalizar La aceleración conocida por la ecuación 1) es la misma que la de un solo objeto de masa $m_1 + m_2$ y sometida a la misma fuerza.

B) Determine la magnitud de la fuerza de contacto entre los dos bloques.

SOLUCIÓN

Conceptualizar La fuerza de contacto es interna al sistema de los dos bloques. Por lo tanto, no es posible hallar la fuerza al representar el sistema como un todo (los dos bloques) en una sola partícula.

Categorizar Considere ahora cada uno de los dos bloques de manera individual al clasificar cada uno como una partícula bajo una fuerza neta.

Analizar Construya primero un diagrama de cuerpo libre para cada bloque, como se muestra en las figuras 5.12b y 5.12c, donde la fuerza de contacto se denota $\vec{\mathbf{P}}$. A partir de la figura 5.12c se ve que la única fuerza horizontal que actúa sobre m_2 es la fuerza de contacto $\vec{\mathbf{P}}_{12}$ (la fuerza que ejerce m_1 sobre m_2), que se dirige hacia la derecha.

Aplique la segunda ley de Newton a m_2:

$$2)\quad \sum F_x = P_{12} = m_2 a_x$$

Sustituya el valor de la aceleración a_x que proporciona la ecuación 1) en la ecuación 2):

$$3)\quad P_{12} = m_2 a_x = \boxed{\left(\frac{m_2}{m_1 + m_2}\right)F}$$

Finalizar Este resultado muestra que la fuerza de contacto P_{12} es *menor* que la fuerza aplicada F. La fuerza que se requiere para acelerar el bloque 2 debe ser menor que la fuerza requerida para producir la misma aceleración para el sistema de dos bloques.

Para finalizar, compruebe esta expresión para P_{12} al considerar las fuerzas que actúan sobre m_1, que se muestran en la figura 5.12b. Las fuerzas que actúan horizontales sobre m_1 son la fuerza aplicada $\vec{\mathbf{F}}$ hacia la derecha y la fuerza de contacto $\vec{\mathbf{P}}_{21}$ hacia la izquierda (la fuerza que ejerce m_2 sobre m_1). A partir de la tercera ley de Newton, $\vec{\mathbf{P}}_{21}$ es la fuerza de reacción a $\vec{\mathbf{P}}_{12}$, de modo que $P_{21} = P_{12}$.

Aplique la segunda ley de Newton a m_1:

$$4)\quad \sum F_x = F - P_{21} = F - P_{12} = m_1 a_x$$

Resuelva para P_{12} y sustituya el valor de a_x de la ecuación 1):

$$P_{12} = F - m_1 a_x = F - m_1\left(\frac{F}{m_1 + m_2}\right) = \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2}\right)F$$

Este resultado concuerda con la ecuación 3), como debe ser.

¿Qué pasaría si? Imagine que la fuerza $\vec{\mathbf{F}}$ en la figura 5.12 se aplica hacia la izquierda en el bloque derecho de masa m_2. ¿La magnitud de la fuerza $\vec{\mathbf{P}}_{12}$ es la misma que cuando la fuerza se aplicó hacia la derecha sobre m_1?

Respuesta Cuando la fuerza se aplica hacia la izquierda sobre m_2, la fuerza de contacto debe acelerar m_1. En la situación original, la fuerza de contacto acelera m_2. Puesto que $m_1 > m_2$, se requiere más fuerza, de modo que la magnitud de $\vec{\mathbf{P}}_{12}$ es mayor que en la situación original.

EJEMPLO 5.8 Peso de un pescado en un elevador

Una persona pesa un pescado de masa m en una balanza de resorte unida al techo de un elevador, como se ilustra en la figura 5.13.

A) Muestre que, si el elevador acelera ya sea hacia arriba o hacia abajo, la balanza de resorte da una lectura que es diferente del peso del pescado.

SOLUCIÓN

Conceptualizar La lectura en la balanza se relaciona con la extensión del resorte en la balanza, que depende de la fuerza en el extremo del resorte, como en la figura 5.2. Imagine que el pescado cuelga de una cuerda unida al extremo del resorte. En este caso, la magnitud de la fuerza que se ejerce sobre el resorte es igual a la tensión T en la cuerda.

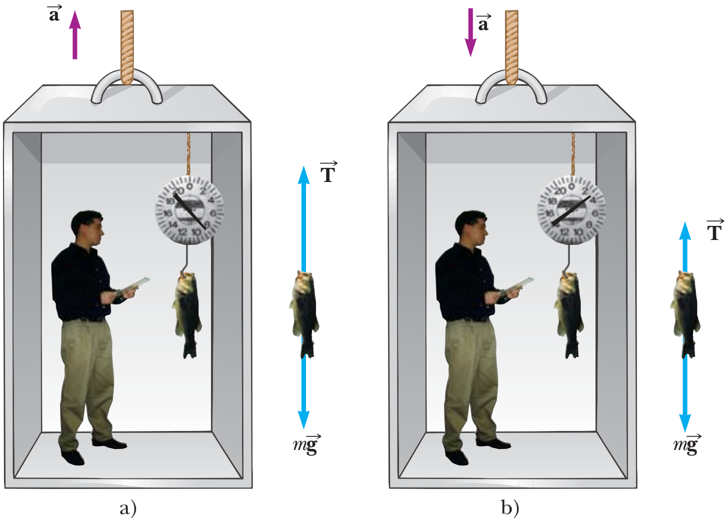


Figura 5.13 (Ejemplo 5.8) Peso aparente contra peso real. a) Cuando el elevador acelera hacia arriba, la lectura en la balanza de resorte proporciona un valor mayor que el peso del pescado. b) Cuando el elevador acelera hacia abajo, la lectura en la balanza de resorte proporciona un valor menor que el peso del pescado.

Por lo tanto, se busca T. La fuerza $\vec{\mathbf{T}}$ jala hacia abajo en la cuerda y hacia arriba en el pescado.

Categorizar Este problema se clasifica al considerar al pescado como una partícula bajo una fuerza neta.

Analizar Inspeccione los diagramas de cuerpo libre para el pescado en la figura 5.13 y advierta que las fuerzas externas que actúan sobre el pescado son la fuerza gravitacional hacia abajo $\vec{\mathbf{F}}_g = m\vec{\mathbf{g}}$ y la fuerza $\vec{\mathbf{T}}$ que ejerce la cuerda. Si el elevador está en reposo o moviéndose con velocidad constante, el pescado es una partícula en equilibrio, de modo que $\Sigma F_y = T - F_g = 0$ o $T = F_g = mg$. (Recuerde que el escalar mg es el peso del pescado.)

Ahora suponga que el elevador se mueve con una aceleración $\vec{\mathbf{a}}$ en relación con un observador que está de pie afuera del elevador en un marco inercial (véase la figura 5.13). Ahora el pescado es una partícula bajo una fuerza neta.

Aplique la segunda ley de Newton al pescado:

$$\sum F_y = T - mg = ma_y$$

Resuelva para T:

$$1)\quad T = ma_y + mg = mg\left(\frac{a_y}{g} + 1\right) = F_g\left(\frac{a_y}{g} + 1\right)$$

donde se eligió hacia arriba como la dirección y positiva. Se concluye de la ecuación 1) que la lectura en la balanza de T es mayor que el peso del pescado mg si $\vec{\mathbf{a}}$ es hacia arriba, de modo que a_y es positiva, y que la lectura es menor que mg si $\vec{\mathbf{a}}$ es hacia abajo, de modo que a_y es negativa.

B) Evalúe las lecturas en la balanza para un pescado de 40.0 N si el elevador se traslada con una aceleración $a_y = \pm 2.00 \text{ m/s}^2$.

Evalúe la lectura en la balanza a partir de la ecuación 1) si $\vec{\mathbf{a}}$ es hacia arriba:

$$T = (40.0 \text{ N})\left(\frac{2.00 \text{ m/s}^2}{9.80 \text{ m/s}^2} + 1\right) = \boxed{48.2 \text{ N}}$$

Evalúe la lectura en la balanza a partir de la ecuación 1) si $\vec{\mathbf{a}}$ es hacia abajo:

$$T = (40.0 \text{ N})\left(\frac{-2.00 \text{ m/s}^2}{9.80 \text{ m/s}^2} + 1\right) = \boxed{31.8 \text{ N}}$$

Finalizar Considere esta opinión: si compra un pescado en un elevador, ¡asegúrese de que el pescado se pesa mientras el elevador está en reposo o en aceleración hacia abajo! Además, note que, a partir de la información que se proporciona en este caso, uno no puede determinar la dirección de movimiento del elevador.

¿Qué pasaría si? Suponga que el cable del elevador se rompe y el elevador y su contenido están en caída libre. ¿Qué sucede con la lectura de la balanza?

Respuesta Si el elevador está en caída libre, su aceleración es $a_y = -g$. De la ecuación 1) se ve que la lectura de la balanza de T en este caso es cero; esto es; el pescado *parece* no tener peso.

EJEMPLO 5.9 La máquina de Atwood

Cuando dos objetos de masas distintas cuelgan verticalmente sobre una polea sin fricción de masa despreciable, como en la figura 5.14a, el dispositivo se llama *máquina de Atwood*. Se usa a veces en el laboratorio para calcular el valor de g. Determine la magnitud de la aceleración de dos objetos y la tensión en la cuerda sin peso.

SOLUCIÓN

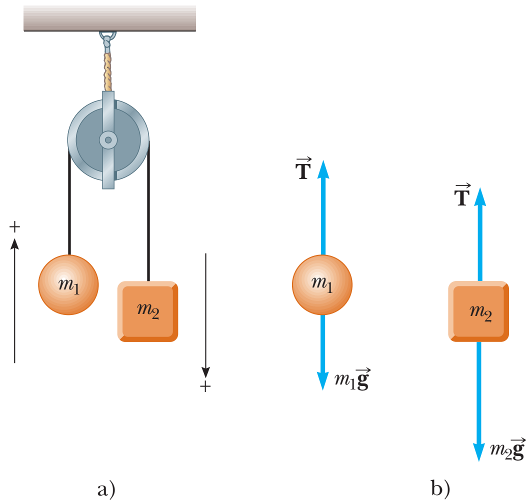


Figura 5.14 (Ejemplo 5.9) La máquina de Atwood. a) Dos objetos conectados mediante una cuerda inextensible sin masa sobre una polea sin fricción. b) Diagramas de cuerpo libre para los dos objetos.

Conceptualizar Imagine en acción la situación que se muestra en la figura 5.14a: conforme un objeto se mueve hacia arriba, el otro objeto se mueve hacia abajo. Puesto que los objetos están conectados mediante una cuerda inextensible, sus aceleraciones son de igual magnitud.

Categorizar Los objetos en la máquina de Atwood están sometidos a la fuerza gravitacional, así como a las fuerzas que se ejercen mediante las cuerdas conectadas a ellos. Por lo tanto, este problema se clasifica como uno que involucra dos partículas bajo una fuerza neta.

Analizar En la figura 5.14b se muestran los diagramas de cuerpo libre para los dos objetos. En cada objeto actúan dos fuerzas: la fuerza hacia arriba $\vec{\mathbf{T}}$ que ejerce la cuerda y la fuerza gravitacional hacia abajo. En problemas como éste, con una polea se representa sin masa y sin fricción, la tensión en la cuerda sobre ambos lados de la polea es la misma. Si la polea tiene masa o es dependiente de la fricción, las tensiones en cualquier lado no son las mismas y la situación requiere técnicas que se aprenderán en el capítulo 10.

Debe tener mucho cuidado con los signos en problemas como éste. En la figura 5.14a, note que, si el objeto 1 acelera hacia arriba, el objeto 2 acelera hacia abajo. Por lo tanto, por consistencia con los signos, si se define la dirección hacia arriba como positiva para el objeto 1, se debe definir la dirección hacia abajo como positiva para el objeto 2. Con esta convención de signos, ambos objetos aceleran en la misma dirección, que se define por la elección de signo. Además, de acuerdo con esta convención de signos, la componente y de la fuerza neta que se ejerce sobre el objeto 1 es $T - m_1g$, y la componente y de la fuerza neta que se ejerce sobre el objeto 2 es $m_2g - T$.

Aplique la segunda ley de Newton al objeto 1:

$$1)\quad \sum F_y = T - m_1g = m_1a_y$$

Ahora al objeto 2:

$$2)\quad \sum F_y = m_2g - T = m_2a_y$$

Sume la ecuación 2) con la ecuación 1) y advierta que T se cancela:

$$-m_1g + m_2g = m_1a_y + m_2a_y$$

Resuelva para la aceleración:

$$3)\quad a_y = \boxed{\left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}\right)g}$$

Sustituya la ecuación 3) en la ecuación 1) para encontrar T:

$$4)\quad T = m_1(g + a_y) = \boxed{\left(\frac{2m_1m_2}{m_1 + m_2}\right)g}$$

Finalizar La aceleración conocida por la ecuación 3) se interpreta como la relación de la magnitud de la fuerza desequilibrada en el sistema $(m_2 - m_1)g$ a la masa total del sistema $(m_1 + m_2)$, como se espera de la segunda ley de Newton. Note que el signo de la aceleración depende de las masas relativas de los dos objetos.

¿Qué pasaría si? Describa el movimiento del sistema si los objetos tienen masas iguales, es decir, $m_1 = m_2$.

Respuesta Si se tiene la misma masa en ambos lados, el sistema está en equilibrio y no debe acelerar. Matemáticamente, se ve que, si $m_1 = m_2$, la ecuación 3) produce $a_y = 0$.

¿Qué pasaría si? ¿Si una de las masas es mucho más grande que la otra: $m_1 >> m_2$?

Respuesta En el caso en el que una masa es infinitamente mayor que la otra, se puede ignorar el efecto de la masa más pequeña. En tal caso, la masa mayor simplemente debe caer como si la masa más pequeña no estuviese ahí. Es claro que, si $m_1 >> m_2$, la ecuación 3) produce $a_y = -g$.

EJEMPLO 5.10 Aceleración de dos objetos conectados mediante una cuerda

Una bola de masa m_1 y un bloque de masa m_2 se unen mediante una cuerda ligera que pasa sobre una polea sin fricción de masa despreciable, como en la figura 5.15a. El bloque se encuentra sobre un plano inclinado sin fricción de ángulo θ. Encuentre la magnitud de la aceleración de los dos objetos y la tensión en la cuerda.

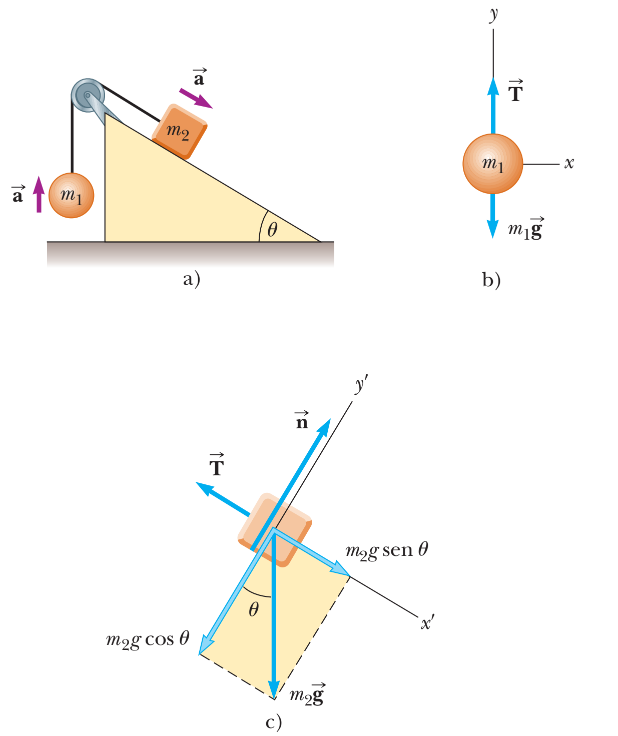


Figura 5.15 (Ejemplo 5.10). a) Dos objetos conectados mediante una cuerda ligera sobre una polea sin fricción. b) Diagrama de cuerpo libre para la bola. c) Diagrama de cuerpo libre para el bloque. (El plano inclinado no tiene fricción.)

SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine que los objetos de la figura 5.15 están en movimiento. Si m_2 se mueve hacia abajo del plano, m_1 se mueve hacia arriba. Puesto que los objetos están conectados mediante una cuerda (la cual se supone que no se estira), sus aceleraciones tienen la misma magnitud.

Categorizar Es posible identificar las fuerzas en cada uno de los dos objetos y se busca una aceleración, de modo que los objetos se clasifican como partículas bajo una fuerza neta.

Analizar Considere los diagramas de cuerpo libre que se muestran en las figuras 5.15b y 5.15c.

Aplique la segunda ley de Newton en forma de componentes a la bola, y elija la dirección hacia arriba como positiva:

$$1)\quad \sum F_x = 0$$

$$2)\quad \sum F_y = T - m_1 g = m_1 a_y = m_1 a$$

Para que la bola acelere hacia arriba, es necesario que $T > m_1 g$. En la ecuación 2), sustituya a_y con a porque la aceleración sólo tiene un componente y.

Para el bloque es conveniente elegir el eje x' positivo a lo largo del plano inclinado, como en la figura 5.15c. Por consistencia con la elección para la bola, se elige la dirección positiva hacia abajo en el plano.

Aplique la segunda ley de Newton en forma de componentes al bloque:

$$3)\quad \sum F_{x'} = m_2 g \operatorname{sen} \theta - T = m_2 a_{x'} = m_2 a$$

$$4)\quad \sum F_{y'} = n - m_2 g \cos \theta = 0$$

En la ecuación 3), sustituya $a_{x'}$ con a porque los dos objetos tienen aceleraciones de igual magnitud a.

Resuelva la ecuación 2) para T:

$$5)\quad T = m_1(g + a)$$

Sustituya esta expresión para T en la ecuación 3):

$$m_2 g \operatorname{sen} \theta - m_1(g + a) = m_2 a$$

Resuelva para a:

$$6)\quad a = \boxed{\frac{m_2 g \operatorname{sen} \theta - m_1 g}{m_1 + m_2}}$$

Sustituya esta expresión para a en la ecuación 5) para encontrar T:

$$7)\quad T = \boxed{\frac{m_1 m_2 g (\operatorname{sen} \theta + 1)}{m_1 + m_2}}$$

Finalizar El bloque acelera hacia abajo en el plano sólo si m_2 sen $\theta > m_1$. Si $m_1 > m_2$ sen θ, la aceleración es hacia arriba del plano para el bloque y hacia abajo para la bola. Note también que el resultado para la aceleración, ecuación 6), se puede interpretar como la magnitud de la fuerza externa neta que actúa sobre el sistema bola–bloque dividido entre la masa total del sistema; este resultado es consistente con la segunda ley de Newton.

¿Qué pasaría si? ¿Qué ocurre en esta situación si $\theta = 90°$?

Respuesta Si $\theta = 90°$, el plano inclinado se vuelve vertical y no hay interacción entre su superficie y m_2. En consecuencia, este problema se convierte en la máquina de Atwood del ejemplo 5.9. Si en las ecuaciones 6) y 7) se deja que $\theta \rightarrow 90°$, ¡ello hace que se reduzcan a las ecuaciones 3) y 4) del ejemplo 5.9!

¿Qué pasaría si? ¿Y si $m_1 = 0$?

Respuesta Si $m_1 = 0$, en tal caso m_2 simplemente se desliza hacia abajo por el plano sin interactuar con m_1 a través de la cuerda. En consecuencia, este problema se convierte en el problema del automóvil que se desliza en el ejemplo 5.6. Si en la ecuación 6) se deja que $m_1 \rightarrow 0$, ¡ello causa que se reduzca a la ecuación 3) del ejemplo 5.6!

5.8 Fuerzas de fricción

Cuando un objeto está en movimiento ya sea sobre una superficie o en un medio viscoso como aire o agua, existe resistencia al movimiento porque el objeto interactúa con su entorno. A tal resistencia se le llama **fuerza de fricción**. Las fuerzas de fricción son muy importantes en la vida cotidiana. Permiten que uno camine o corra y son necesarias para el movimiento de los vehículos con ruedas.

Imagine que trabaja en su jardín y llena un bote de basura con desechos de hojas. Luego intenta arrastrar el bote a través de la superficie de concreto de su patio, como en la figura 5.16a. Esta superficie es *real*, no una superficie idealizada sin fricción.

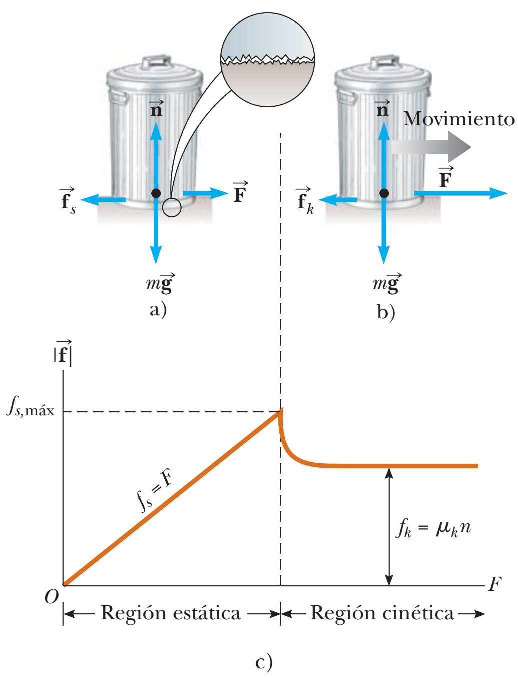


Figura 5.16 Cuando jala un bote de basura, la dirección de la fuerza de fricción $\vec{f}$ entre el bote y una superficie rugosa es opuesta a la dirección de la fuerza aplicada $\vec{F}$. Puesto que ambas superficies son rugosas, el contacto sólo se realiza en algunos puntos, como se ilustra en la vista "amplificada". a) Para pequeñas fuerzas aplicadas, la magnitud de la fuerza de fricción estática es igual a la magnitud de la fuerza aplicada. b) Cuando la magnitud de la fuerza aplicada supera la magnitud de la fuerza máxima de fricción estática, el bote de basura queda libre. La fuerza aplicada ahora es mayor que la fuerza de fricción cinética y el bote puede acelerar hacia la derecha. c) Gráfica de fuerza de fricción en función de la fuerza aplicada. Note que $f_{s,\text{máx}} > f_k$.

Si se aplica una fuerza horizontal externa $\vec{\mathbf{F}}$ al bote de basura, que actúa hacia la derecha, el bote de basura permanece fijo cuando $\vec{\mathbf{F}}$ es pequeña. La fuerza sobre el bote de basura que contraataca $\vec{\mathbf{F}}$ y evita que se mueva actúa hacia la izquierda y se llama **fuerza de fricción estática** $\vec{\mathbf{f}}_s$. En tanto el bote de basura no se mueva, $f_s = F$. Por lo tanto, si $\vec{\mathbf{F}}$ aumenta, $\vec{\mathbf{f}}_s$ también aumenta. Del mismo modo, si $\vec{\mathbf{F}}$ disminuye, $\vec{\mathbf{f}}_s$ también disminuye. Los experimentos muestran que la fuerza de fricción surge de la naturaleza de las dos superficies: debido a su rugosidad, el contacto se realiza sólo en unas cuantas posiciones donde se tocan los picos del material, como se muestra en la vista amplificada de la superficie en la figura 5.16a.

Fuerza de fricción estática ▶

En dichas posiciones, la fuerza de fricción surge en parte porque un pico físicamente bloquea el movimiento de un pico de la superficie opuesta y en parte por el enlace químico ("punto de soldadura") de picos opuestos conforme entran en contacto. Aunque los detalles de la fricción son muy complejos al nivel atómico, esta fuerza involucra, a final de cuentas, una interacción eléctrica entre átomos o moléculas.

Si se aumenta la magnitud de $\vec{\mathbf{F}}$ como en la figura 5.16b, el bote de basura al final se desliza. Cuando el bote de basura está a punto de deslizarse, f_s tiene su valor máximo $f_{s,\text{máx}}$, como se muestra en la figura 5.16c. Cuando F supera $f_{s,\text{máx}}$, el bote de basura se mueve y acelera hacia la derecha. A la fuerza de fricción para un objeto en movimiento se le llama **fuerza de fricción cinética** $\vec{\mathbf{f}}_k$. Cuando el bote de basura está en movimiento, la fuerza de fricción cinética en el bote es menor que $f_{s,\text{máx}}$ (figura 5.16c). La fuerza neta $F - f_k$ en la dirección x produce una aceleración hacia la derecha, de acuerdo con la segunda ley de Newton. Si $F = f_k$, la aceleración es cero y el bote de basura se mueve hacia la derecha con rapidez constante. Si la fuerza aplicada $\vec{\mathbf{F}}$ se elimina del bote en movimiento, la fuerza de fricción $\vec{\mathbf{f}}_k$ que actúa hacia la izquierda proporciona una aceleración del bote de basura en la dirección $-x$ y al final lo lleva al reposo, lo que, de nuevo, es consistente con la segunda ley de Newton.

Fuerza de fricción cinética ▶

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.9

El signo igual se usa en situaciones limitadas

En la ecuación 5.9 el signo igual se usa *sólo* en caso de que las superficies estén a punto de liberarse y comiencen a deslizarse. No caiga en la trampa común de usar $f_s = \mu_s n$ en *cualquier* situación estática.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.10

Ecuaciones de fricción

Las ecuaciones 5.9 y 5.10 *no* son ecuaciones vectoriales. Son correspondencias entre las *magnitudes* de los vectores que representan las fuerzas de fricción y normal. Puesto que las fuerzas de fricción y normal son mutuamente perpendiculares, los vectores no se pueden relacionar mediante una constante multiplicativa.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 5.11

La dirección de la fuerza de fricción

En ocasiones se hace un enunciado incorrecto acerca de la fuerza de fricción entre un objeto y una superficie ("la fuerza de fricción en un objeto es opuesta a su movimiento o al movimiento inminente") en lugar de la frase correcta: "la fuerza de fricción en un objeto es opuesta a su movimiento o al movimiento inminente *en relación con la superficie*".

En términos experimentales, se encuentra que, a una buena aproximación, tanto $f_{s,\text{máx}}$ como f_k son proporcionales a la magnitud de la fuerza normal que se ejerce sobre un objeto por la superficie. Las siguientes descripciones de la fuerza de fricción están en función de las observaciones experimentales y sirven como el modelo que usará para fuerzas de fricción en resolución de problemas:

- La magnitud de la fuerza de fricción estática entre cualesquiera dos superficies cualesquiera en contacto tiene los valores

$$f_s \leq \mu_s n \tag{5.9}$$

  donde la constante adimensional μ_s se llama **coeficiente de fricción estática** y n es la magnitud de la fuerza normal que ejerce una superficie sobre la otra. La igualdad en la ecuación 5.9 se cumple cuando las superficies están a punto de deslizarse, esto es, cuando $f_s = f_{s,\text{máx}} \equiv \mu_s n$. Esta situación se llama *movimiento inminente*. La desigualdad se cumple cuando las superficies no están a punto de deslizarse.
- La magnitud de la fuerza de fricción cinética que actúa entre dos superficies es

$$f_k = \mu_k n \tag{5.10}$$

  donde μ_k se llama **coeficiente de fricción cinética**. Aunque el coeficiente de fricción cinética varía con la rapidez, por lo general en este texto se despreciará cualquiera de tales variaciones.
- Los valores de μ_k y μ_s dependen de la naturaleza de las superficies, pero μ_k por lo general es menor que μ_s. El intervalo de los valores típicos fluctúan de 0.03 a 1.0. La tabla 5.1 indica algunos valores reportados.
- La dirección de la fuerza de fricción sobre un objeto es paralela a la superficie con la que el objeto está en contacto y opuesta al movimiento real (fricción cinética) o al movimiento inminente (fricción estática) del objeto en relación con la superficie.
- Los coeficientes de fricción son casi independientes del área de contacto entre las superficies. Es de esperar que al colocar un objeto en el lado que tiene más área aumente la fuerza de fricción. Aunque este método proporciona más puntos de contacto como en la figura 5.16a, el peso del objeto se dispersa sobre un área más

TABLA 5.1

Coeficientes de fricción

	μ_s	μ_k
Hule sobre concreto	1.0	0.8
Acero sobre acero	0.74	0.57
Aluminio sobre acero	0.61	0.47
Vidrio sobre vidrio	0.94	0.4
Cobre sobre acero	0.53	0.36
Madera sobre madera	0.25–0.5	0.2
Madera encerada sobre nieve húmeda	0.14	0.1
Madera encerada sobre nieve seca	—	0.04
Metal sobre metal (lubricado)	0.15	0.06
Teflón sobre teflón	0.04	0.04
Hielo sobre hielo	0.1	0.03
Articulación sinovial en humanos	0.01	0.003

Nota: Todos los valores son aproximados. En algunos casos el coeficiente de fricción puede superar 1.0.

grande y los puntos individuales no se oprimen tan estrechamente entre sí. Ya que estos efectos se compensan, aproximadamente, uno con otro, la fuerza de fricción es independiente del área.

Pregunta rápida 5.6 Usted presiona con su mano su libro de física plano contra una pared vertical. ¿Cuál es la dirección de la fuerza de fricción que ejerce la pared sobre el libro? a) hacia abajo, b) hacia arriba, c) afuera desde la pared, d) hacia dentro de la pared.

Pregunta rápida 5.7 Usted juega con su hija en la nieve. Ella se sienta sobre un trineo y le pide que la deslice sobre un campo horizontal plano. Usted tiene la opción de a) empujarla desde atrás al aplicar una fuerza hacia abajo sobre sus hombros a 30° bajo la horizontal (figura 5.17a) o b) unir una cuerda al frente del trineo y jalar con una fuerza a 30° sobre la horizontal (figura 5.17b). ¿Cuál sería más fácil para usted y por qué?

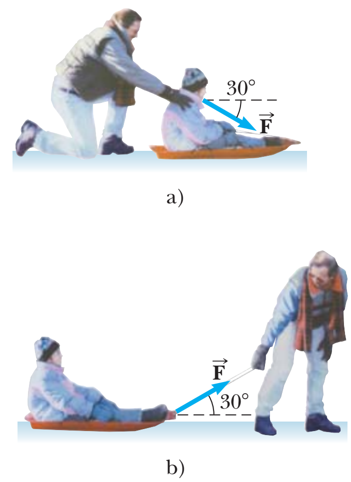


Figura 5.17 (Pregunta rápida 5.7) Un padre desliza a su hija sobre un trineo mediante a) empujar sobre sus hombros o b) jalar con una cuerda.

EJEMPLO 5.11 Determinación experimental de μ_s y μ_k

El siguiente es un método simple de medir coeficientes de fricción. Suponga que se coloca un bloque sobre una superficie rugosa inclinada en relación con la horizontal, como se muestra en la figura 5.18. El ángulo de inclinación aumenta hasta que el bloque comienza a moverse. Demuestre que puede obtener μ_s al medir el ángulo crítico θ_c al que comienza a ocurrir este deslizamiento.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Considere el diagrama de cuerpo libre en la figura 5.18 e imagine que el bloque tiende a deslizarse por el plano debido a la fuerza gravitacional. Para simular la situación, coloque una moneda sobre la cubierta de este libro e incline el libro hasta que la moneda comience a deslizarse.

Categorizar El bloque está sometido a diferentes fuerzas. Puesto que el plano se eleva al ángulo en que el bloque está listo para comenzar a moverse pero no se mueve, el bloque se clasifica como una partícula en equilibrio.

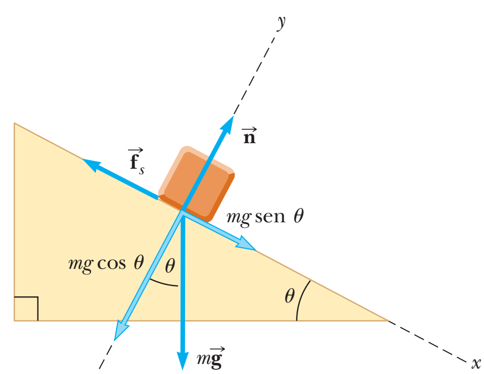


Figura 5.18 (Ejemplo 5.11) Las fuerzas externas que se ejercen sobre un bloque que se encuentra sobre un plano inclinado rugoso son la fuerza gravitacional $m\vec{\mathbf{g}}$, la fuerza normal $\vec{\mathbf{n}}$ y la fuerza de fricción $\mathbf{f}_s$. Por conveniencia, la fuerza gravitacional se descompone en una componente mg sen θ a lo largo del plano y una componente $mg \cos \theta$ perpendicular al plano.

Analizar Las fuerzas que actúan en el bloque son la fuerza gravitacional $m\vec{\mathbf{g}}$, la fuerza normal $\vec{\mathbf{n}}$ y la fuerza de fricción estática $\vec{\mathbf{f}}_s$. Se elige x paralelo al plano y y perpendicular a él.

Aplique la ecuación 5.8 al bloque:

$$1)\quad \sum F_x = mg \text{ sen } \theta - f_s = 0$$

$$2)\quad \sum F_y = n - mg \cos \theta = 0$$

Sustituya $mg = n/\cos\theta$ de la ecuación 2) en la ecuación 1):

$$3)\quad f_s = mg \text{ sen } \theta = \left(\frac{n}{\cos\theta}\right) \text{sen } \theta = n \tan \theta$$

Cuando el ángulo de inclinación aumenta hasta que el bloque está a punto de deslizarse, la fuerza de fricción estática alcanza su valor máximo $\mu_s n$. El ángulo θ en esta situación es el ángulo crítico θ_c. Haga estas sustituciones en la ecuación 3):

$$\mu_s n = n \tan \theta_c$$

$$\mu_s = \tan \theta_c$$

Por ejemplo, si el bloque apenas se desliza en $\theta_c = 20.0°$, se encuentra que $\mu_s = \tan 20.0° = 0.364$.

Finalizar Una vez que el bloque comienza a moverse en $\theta \geq \theta_c$, acelera hacia abajo por el plano y la fuerza de fricción es $f_k = \mu_k n$. Sin embargo, si θ se reduce a un valor menor que θ_c, puede ser posible encontrar un ángulo θ'_c tal que el bloque se mueve hacia abajo por el plano con rapidez constante de nuevo como una partícula en equilibrio ($a_x = 0$). En este caso, use las ecuaciones 1) y 2) con f_s en lugar de f_k para encontrar μ_k: $\mu_k = \tan \theta'_c$, donde $\theta'_c < \theta_c$.

EJEMPLO 5.12 Disco de hockey deslizante

A un disco de hockey sobre un estanque congelado se le da una rapidez inicial de 20.0 m/s. Si el disco siempre permanece sobre el hielo y se desliza 115 m antes de llegar al reposo, determine el coeficiente de fricción cinética entre el disco y el hielo.

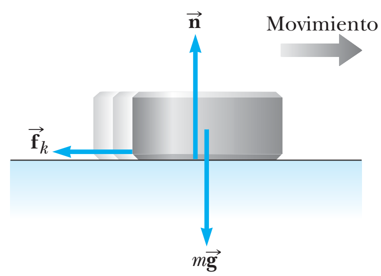


Figura 5.19 (Ejemplo 5.12) Después de que al disco se le da una velocidad inicial hacia la derecha, las únicas fuerzas externas que actúan sobre él son la fuerza gravitacional $m\vec{\mathbf{g}}$, la fuerza normal $\vec{\mathbf{n}}$ y la fuerza de fricción cinética $\vec{\mathbf{f}}_k$.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine que el disco de la figura 5.19 se desliza hacia la derecha y al final llega al reposo debido a la fuerza de fricción cinética.

Categorizar Las fuerzas que actúan sobre el disco se identifican en la figura 5.19, pero el texto del problema proporciona variables cinemáticas. Por lo tanto, el problema se clasifica en dos formas. Primero, el problema involucra una partícula bajo una fuerza neta: la fricción cinética ocasiona que el disco acelere. Y, ya que la fuerza de fricción cinética se representa como independiente de la rapidez, la aceleración del disco es constante. Así que este problema también se clasifica como una partícula bajo aceleración constante.

Analizar Primero, encuentre la aceleración algebraicamente en términos del coeficiente de fricción cinética, con la segunda ley de Newton. Una vez que conozca la aceleración del disco y la distancia que recorre, encuentre las ecuaciones de cinemática para encontrar el valor numérico del coeficiente de fricción cinética.

Aplique el modelo de partícula bajo una fuerza neta en la dirección x del disco:

$$1)\quad \sum F_x = -f_k = ma_x$$

Aplique el modelo de partícula en equilibrio en la dirección y del disco:

$$2)\quad \sum F_y = n - mg = 0$$

Sustituya $n = mg$ de la ecuación 2) y $f_k = \mu_k n$ en la ecuación 1):

$$-\mu_k n = -\mu_k mg = ma_x$$

$$a_x = -\mu_k g$$

El signo negativo significa que la aceleración es hacia la izquierda en la figura 5.19. Ya que la velocidad del disco es hacia la derecha, el disco frena. La aceleración es independiente de la masa del disco y es constante porque se supone que μ_k permanece constante.

Aplique el modelo de partícula bajo aceleración constante al disco, con la ecuación 2.17, $v_{xf}^2 = v_{xi}^2 + 2a_x(x_f - x_i)$, con $x_i = 0$ y $v_f = 0$:

$$0 = v_{xi}^2 + 2a_x x_f = v_{xi}^2 - 2\mu_k g x_f$$

$$\mu_k = \frac{v_{xi}^2}{2gx_f}$$

$$\mu_k = \frac{(20.0 \text{ m/s})^2}{2(9.80 \text{ m/s}^2)(115 \text{ m})} = \boxed{0.117}$$

Finalizar Observe que μ_k es adimensional, cual debe ser, y que tiene un valor menor, consistente con un objeto que se desliza en hielo.

EJEMPLO 5.13 Aceleración de dos objetos conectados cuando la fricción está presente

Un bloque de masa m_1 sobre una superficie horizontal rugosa se conecta a una bola de masa m_2 mediante una cuerda ligera sobre una polea ligera sin fricción, como se muestra en la figura 5.20a. Al bloque se aplica una fuerza de magnitud F en un ángulo θ con la horizontal como se muestra, y el bloque se desliza hacia la derecha. El coeficiente de fricción cinética entre el bloque y la superficie es μ_k. Determine la magnitud de la aceleración de los dos objetos.

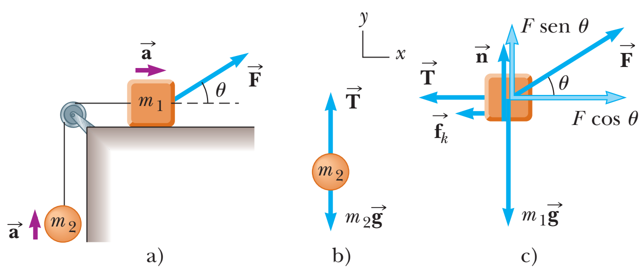


Figura 5.20 (Ejemplo 5.13) a) La fuerza externa $\vec{\mathbf{F}}$ aplicada como se muestra puede hacer que el bloque acelere hacia la derecha. b) y c) Diagramas de cuerpo libre que suponen que el bloque acelera hacia la derecha y la bola acelera hacia arriba. La magnitud de la fuerza de fricción cinética en este caso está dada por $f_k = \mu_k n = \mu_k (m_1 g - F \text{ sen } \theta)$.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine lo que ocurre conforme se aplica $\vec{\mathbf{F}}$ al bloque. Si supone que $\vec{\mathbf{F}}$ no es suficientemente grande como para levantar el bloque, éste se desliza hacia la derecha y la bola sube.

Categorizar Se pueden identificar las fuerzas y se quiere una aceleración, así que este problema se clasifica como dos partículas bajo una fuerza neta, la bola y el bloque.

Analizar Primero dibuje diagramas de cuerpo libre para los dos objetos, como se muestra en las figuras 5.20b y 5.20c. La fuerza aplicada $\vec{\mathbf{F}}$ tiene componentes x y y $F \cos \theta$ y F sen θ, respectivamente. Ya que los dos objetos están conectados, se pueden igualar las magnitudes de la componente x de la aceleración del bloque y la componente y de la aceleración de la bola y llamar a ambas a. Suponga que el movimiento del bloque es hacia la derecha.

Aplique el modelo de partícula bajo una fuerza neta al bloque en la dirección horizontal:

$$1) \quad \sum F_x = F \cos \theta - f_k - T = m_1 a_x = m_1 a$$

Aplique el modelo de partícula en equilibrio al bloque en la dirección vertical:

$$2) \quad \sum F_y = n + F \text{ sen } \theta - m_1 g = 0$$

Aplique el modelo de partícula bajo una fuerza neta a la bola en la dirección vertical:

$$3) \quad \sum F_y = T - m_2 g = m_2 a_y = m_2 a$$

Resuelva la ecuación 2) para n:
$$n = m_1 g - F \operatorname{sen} \theta$$

Sustituya n en $f_k = \mu_k n$ de la ecuación 5.10:
$$4) \quad f_k = \mu_k(m_1 g - F \operatorname{sen} \theta)$$

Sustituya la ecuación 4) y el valor de T de la ecuación 3) en la ecuación 1):
$$F \cos \theta - \mu_k(m_1 g - F \operatorname{sen} \theta) - m_2(a + g) = m_1 a$$

Resuelva para a:
$$5) \quad a = \boxed{\frac{F(\cos \theta + \mu_k \operatorname{sen} \theta) - (m_2 + \mu_k m_1)g}{m_1 + m_2}}$$

Finalizar La aceleración del bloque puede ser hacia la derecha o hacia la izquierda, depende del signo del numerador en la ecuación 5). Si el movimiento es hacia la izquierda, se debe invertir el signo de f_k en la ecuación 1) porque la fuerza de fricción cinética se debe oponer al movimiento del bloque en relación con la superficie. En este caso, el valor de a es el mismo que en la ecuación 5), con los dos signos más en el numerador cambiados a signos menos.

Resumen

DEFINICIONES

Un **marco de referencia inercial** es un marco en el que un objeto que no interactúa con otros objetos experimenta aceleración cero. Cualquier marco que se mueva con velocidad constante en relación con un marco inercial también es un marco inercial.

La **fuerza** se define como **aquello que causa un cambio en el movimiento de un objeto.**

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La **primera ley de Newton** establece que es posible encontrar un marco inercial en el que un objeto que no interactúa con otros objetos experimenta aceleración cero o, de manera equivalente, en ausencia de una fuerza externa, cuando se observa desde un marco inercial, un objeto en reposo permanece en reposo y un objeto en movimiento uniforme en línea recta mantiene dicho movimiento.
La **segunda ley de Newton** afirma que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa.
La **tercera ley de Newton** postula que, si dos objetos interactúan, la fuerza que ejerce el objeto 1 sobre el objeto 2 es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza que ejerce el objeto 2 sobre el objeto 1.

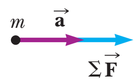
La **fuerza gravitacional** que se ejerce sobre un objeto es igual al producto de su masa (una cantidad escalar) y la aceleración de caída libre: $\vec{\mathbf{F}}_g = m\vec{\mathbf{g}}$.
El **peso** de un objeto es la magnitud de la fuerza gravitacional que actúa sobre el objeto.

La **máxima fuerza de fricción estática** $\vec{\mathbf{f}}_{s,\text{máx}}$ entre un objeto y una superficie es proporcional a la fuerza normal que actúa sobre el objeto. En general, $f_s \leq \mu_s n$, donde μ_s es el **coeficiente de fricción estática** y n es la magnitud de la fuerza normal. Cuando un objeto se desliza sobre una superficie, la magnitud de la **fuerza de fricción cinética** $\vec{\mathbf{f}}_k$ está dada por $f_k = \mu_k n$, donde μ_k es el **coeficiente de fricción cinética**. La dirección de la fuerza de fricción es opuesta a la dirección del movimiento o movimiento inminente del objeto en relación con la superficie.

MODELO DE ANÁLISIS PARA RESOLVER PROBLEMAS

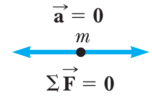
Partícula bajo fuerza neta Si una partícula de masa m experimenta una fuerza neta distinta de cero, su aceleración se relaciona con la fuerza neta mediante la segunda ley de Newton:

$$\sum \vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}} \qquad (5.2)$$



Partícula en equilibrio Si una partícula mantiene una velocidad constante (de modo que $\vec{\mathbf{a}} = 0$), que podría incluir una velocidad de cero, las fuerzas sobre la partícula se equilibran y la segunda ley de Newton se reduce a

$$\sum \vec{\mathbf{F}} = 0 \qquad (5.8)$$



Preguntas

O indica pregunta complementaria.

1. Una bola se sostiene en la mano de una persona. a) Identifique todas las fuerzas externas que actúan sobre la bola y la reacción a cada una. b) Si la bola se suelta, ¿qué fuerza se ejerce sobre ella mientras cae? Identifique la fuerza de reacción en este caso. (Ignore la resistencia del aire.)
2. Si un automóvil viaja hacia el oeste con una rapidez constante de 20 m/s, ¿cuál es la fuerza resultante que actúa sobre él?
3. **O** Un experimento se realiza sobre un disco en una mesa de hockey de aire, donde la fricción es despreciable. Se aplica una fuerza horizontal constante al disco y se mide su aceleración. Ahora el mismo disco se transporta hacia el espacio exterior, donde tanto la fricción como la gravedad son despreciables. Al disco se le aplica la misma fuerza constante (a través de una balanza de resorte que estira la misma cantidad) y se mide la aceleración del disco (en relación con las estrellas distantes). ¿Cuál es la aceleración del disco en el espacio exterior? a) un poco mayor que su aceleración en la Tierra, b) la misma que su aceleración en la Tierra, c) menor que su aceleración en la Tierra, d) infinita porque ni la fricción ni la gravedad la restringen, e) muy grande porque la aceleración es inversamente proporcional al peso y el peso del disco es muy pequeño pero no cero.
4. En la película *It Happened One Night* (Columbia Pictures, 1934), Clark Gable está de pie adentro de un autobús estacionado en frente de Claudette Colbert, quien está sentada. De pronto el autobús comienza a moverse hacia adelante y Clark cae en el regazo de Claudette. ¿Por qué ocurrió esto?
5. Sus manos están húmedas y el dispensador de toallas del baño está vacío. ¿Qué hace para quitar las gotas de agua de sus manos? ¿Cómo su acción ejemplifica una de las leyes de Newton? ¿Cuál de ellas?
6. Una pasajera sentada en la parte trasera de un autobús afirma que se lesionó cuando el conductor frenó bruscamente, lo que hizo que una maleta saliera volando hacia ella desde la parte delantera del autobús. Si usted fuese el juez en este caso, ¿qué sentencia haría? ¿Por qué?
7. Un globo esférico de hule inflado con aire se mantiene fijo y su abertura, en el lado oeste, se aprieta firmemente. a) Describa las fuerzas que ejerce el aire sobre secciones del hule. b) Después de que el globo se libera, despega hacia el este y pronto gana mucha rapidez. Explique este movimiento en términos de las fuerzas que ahora actúan sobre el hule. c) Explique el movimiento de un cohete que despega desde su plataforma de lanzamiento.
8. Si usted sostiene una barra metálica horizontal varios centímetros arriba del suelo y la mueve a través del pasto, cada hoja de pasto se dobla en el camino. Si aumenta la rapidez de la barra, cada hoja de pasto se doblará más rápidamente. En tal caso, ¿cómo una podadora rotatoria corta el pasto? ¿Cómo ejerce suficiente fuerza sobre una hoja de pasto para cortarla?
9. Una bola de hule se suelta en el suelo. ¿Qué fuerza hace que la bola rebote?
10. Una niña lanza una bola hacia arriba. Ella dice que la bola se mueve alejándose de su mano porque la bola siente una "fuerza de lanzamiento" hacia arriba así como la fuerza gravitacional. a) ¿La "fuerza de lanzamiento" supera la fuerza gravitacional? ¿Cómo se movería la bola si lo hiciera? b) ¿La "fuerza de lanzamiento" es igual en magnitud a la fuerza gravitacional? Explique. c) ¿Qué intensidad se puede atribuir con precisión a la fuerza de lanzamiento? Explique. d) ¿Por qué la bola se aleja de la mano de la niña?
11. **O** Los alumnos de tercer año están en un lado del patio de la escuela y los de cuarto año están en el otro. Los grupos lanzan bolas de nieve uno a otro. Entre ellos, bolas de nieve de diversas masas se mueven con diferentes velocidades, como se muestra en la figura P5.11. Clasifique las bolas de nieve de la a) a la e) de acuerdo con la magnitud de la fuerza total que se ejerce sobre cada una. Ignore la resistencia del aire. Si dos bolas de nieve se clasifican juntas, aclare el hecho.

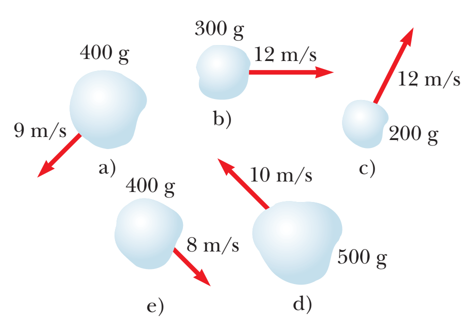


Figura P5.11

12. El alcalde de una ciudad decide despedir a algunos empleados porque no corrigen los obvios pandeos de los cables que sostienen los semáforos de la ciudad. Si fuera abogado, ¿qué defensa daría en favor de los empleados? ¿Qué lado cree que ganaría el caso en la corte?

13. Un segmento de *America's Funniest Home Videos*. Equilibrándose con cuidado, tres chicos avanzan lentamente en la rama horizontal de un árbol sobre un estanque, donde cada uno planea echarse un clavado. El más joven e inteligente de los chicos nota que la rama es apenas suficientemente fuerte como para sostenerlos. Decide saltar recto hacia arriba y aterrizar de nuevo sobre la rama para romperla, lo que hará que los tres caigan juntos en el estanque. Cuando comienza a realizar su plan, ¿en qué momento preciso se rompe la rama? Explique. *Sugerencia:* Pretenda ser el chico inteligente e imite lo que hace en cámara lenta. Si todavía no está seguro, párese en una báscula de baño y repita la sugerencia.

14. Cuando empuja sobre una caja con una fuerza de 200 N en lugar de una fuerza de 50 N, puede sentir que hace un mayor esfuerzo. Cuando una mesa ejerce una fuerza normal hacia arriba de 200 N en lugar de una de magnitud más pequeña, ¿la mesa realmente hace algo de modo diferente?

15. Un levantador de pesas está de pie sobre una báscula. Sube y baja una barra con pesas. ¿Qué ocurre con la lectura de la báscula mientras lo hace? **¿Qué pasaría si?** ¿Qué sucedería si en efecto él es lo suficientemente fuerte para lanzar la barra hacia arriba? ¿Ahora cómo variaría la lectura en la balanza?

16. a) ¿Una fuerza normal puede ser horizontal? b) ¿Una fuerza normal puede dirigirse verticalmente hacia abajo? c) Considere una pelota de tenis en contacto con un suelo fijo y con nada más. ¿La fuerza normal puede ser diferente en magnitud de la fuerza gravitacional que se ejerce sobre la pelota? d) ¿La fuerza que ejerce el suelo sobre la bola puede ser diferente en magnitud de la fuerza que la bola ejerce sobre el suelo? Explique cada una de sus respuestas.

17. Suponga que un camión cargado con arena acelera a lo largo de una autopista. Si la fuerza impulsora que se ejerce sobre el camión permanece constante, ¿qué ocurre con la aceleración del camión si su remolque tiene una fuga de arena con una rapidez constante a través de un orificio en su fondo?

18. **O** En la figura P5.18, la cuerda B, inextensible, tensa y ligera une el bloque 1 y el bloque 2 de mayor masa. La cuerda A ejerce una fuerza sobre el bloque 1 para hacerlo acelerar hacia adelante. a) ¿Cómo se compara la magnitud de la fuerza que ejerce la cuerda A sobre el bloque 1, con la magnitud de la fuerza que ejerce la cuerda B sobre el bloque 2? ¿Es mayor, menor o igual? b) ¿Cómo se compara la aceleración del bloque 1 con la aceleración (si la hay) del bloque 2? c) ¿La cuerda B ejerce una fuerza sobre el bloque 1? Si es así, ¿es hacia adelante o hacia atrás? ¿Es mayor, menor o igual en magnitud a la fuerza que ejerce la cuerda B sobre el bloque 2?

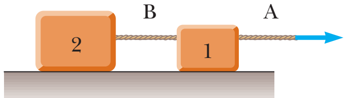


Figura P5.18

19. Identifique los pares acción–reacción en las situaciones siguientes: un hombre da un paso, una bola de nieve golpea a una niña en la espalda, un jugador de beisbol atrapa una bola, una ráfaga de viento golpea una ventana.

20. **O** En una máquina de Atwood, que se ilustra en la figura 5.14, una cuerda ligera que no se estira pasa sobre una polea ligera sin fricción. En un lado, el bloque 1 cuelga de la cuerda vertical. En el otro lado, el bloque 2 de mayor masa cuelga de la cuerda vertical. a) Los bloques se liberan desde el reposo. ¿La magnitud de la aceleración del bloque 2 más pesado es mayor, menor o igual que la aceleración en caída libre *g*? b) ¿La magnitud de la aceleración del bloque 2 es mayor, menor o igual que la aceleración del bloque 1? c) ¿La magnitud de la fuerza que ejerce la cuerda sobre el bloque 2 es mayor, menor o igual que la fuerza de la cuerda sobre el bloque 1?

21. Veinte personas participan en un concurso de jalar la cuerda. Los dos equipos de 10 personas están tan igualmente distribuidos que ningún equipo gana. Después del juego, los participantes notan que un automóvil está atorado en el lodo. Unen la soga del juego a la defensa del automóvil y todas las personas jalan la soga. El pesado automóvil apenas se mueve un par de decímetros cuando la soga se rompe. ¿Por qué se rompe en esta situación, pero no cuando las mismas 20 personas jalaban sobre ella durante el juego?

22. **O** En la figura P5.22, una locomotora cae a través de la pared de una estación ferroviaria. Por como lo hizo, ¿qué puede decir acerca de la fuerza que ejerce la locomotora sobre la pared? a) La fuerza que ejerció la locomotora sobre la pared fue mayor que la fuerza que la pared podía ejercer sobre la locomotora. b) La fuerza que ejerció la locomotora sobre la pared fue de igual magnitud que la fuerza que ejerció la pared sobre la locomotora. c) La fuerza que ejerció la locomotora sobre la pared fue menor que la fuerza que ejerció la pared sobre la locomotora. d) No se puede decir que la pared "ejerció" una fuerza; después de todo, se rompió.

Roger Viollet, Mill Valley, CA, University Science Books, 1982

Figura P5.22

23. Un atleta sujeta una cuerda ligera que pasa sobre una polea sin fricción unida al techo de un gimnasio. Al otro extremo de la cuerda se amarra un saco de arena precisamente igual en peso al atleta. Tanto el saco como el atleta al inicio están en reposo. El atleta escala la cuerda, a veces acelerando y frenando mientras lo hace. ¿Qué ocurre con el saco de arena? Explique.

24. **O** Un pequeño insecto está anidado entre un bloque de 1 kg y un bloque de 2 kg sobre una mesa sin fricción. Sobre cualquier bloque se puede aplicar una fuerza horizontal, como se muestra en la figura P5.24. **i)** ¿En cuál situación ilustrada en la figura, a) o b), el insecto tiene una mejor oportunidad de sobrevivir, o c) no hay diferencia? **ii)** Considere el enunciado "La fuerza que ejerce el bloque más grande sobre el más pequeño es mayor en magnitud que la fuerza que ejerce el bloque más pequeño sobre el mayor". ¿El enunciado es verdadero sólo en la situación a)? ¿Sólo en la situación b)? ¿En c) ambas situaciones o d) en ninguna? **iii)** Considere el enunciado "mientras los bloques se mueven, la fuerza que ejerce el bloque trasero sobre el bloque delantero es mayor que la fuerza que ejerce el bloque delantero sobre el trasero". ¿Este enunciado es verdadero sólo en la situación a), sólo en la situación b), c) en ambas situaciones o d) en ninguna?

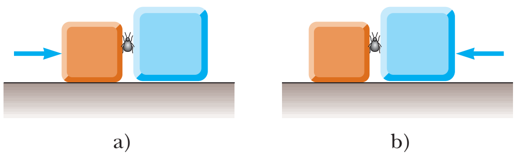


Figura P5.24

25. ¿Un objeto puede ejercer una fuerza sobre sí mismo? Argumente su respuesta.

26. O El molesto gerente de una tienda departamental empuja horizontalmente con una fuerza de 200 N de magnitud sobre una caja de camisas. La caja se desliza a través del suelo horizontal con una aceleración hacia adelante. Nada más toca la caja. ¿Qué debe ser verdadero acerca de la magnitud de la fuerza de fricción cinética que actúa sobre la caja (elija una)? a) Es mayor que 200 N. b) Es menor que 200 N. c) Es igual a 200 N. d) Ninguno de estos enunciados necesariamente es verdadero.

27. Un automóvil se mueve hacia adelante lentamente y aumenta su rapidez. Un estudiante afirma "el automóvil ejerce una fuerza sobre sí mismo" o "el motor del automóvil ejerce una fuerza en el automóvil". Argumente que esta idea no puede ser exacta y que la fricción que ejerce el camino es la fuerza propulsora sobre el automóvil. Haga su evidencia y razonamiento tan persuasivo como sea posible. ¿Es fricción estática o cinética? *Sugerencia:* Considere un camino cubierto con grava ligera. Considere una impresión clara de la huella de la llanta sobre un camino de asfalto, obtenida al recubrir la huella con polvo.

28. O El conductor de un camión vacío que viaja con gran rapidez aplica los frenos y derrapa hasta detenerse a través de una distancia d. **i)** Si el camión ahora lleva una carga que duplica su masa, ¿cuál será la "distancia de derrape" del camión? a) $4d$, b) $2d$, c) $\sqrt{2}d$, d) d, e) $d/\sqrt{2}$, f) $d/2$, g) $d/4$. **ii)** Si la rapidez inicial del camión vacío se redujera a la mitad, ¿cuál sería la distancia de derrape del camión? Elija de las mismas posibilidades de la a) a la g).

29. O Un objeto de masa m se desliza con rapidez v_0 en cierto instante a través de una mesa a nivel, con la que su coeficiente de fricción cinética es μ. Luego se mueve a través de una distancia d y llega al reposo. ¿Cuál de las siguientes ecuaciones para la rapidez v_0 es razonable (elija una)? a) $v_0 = \sqrt{-2\mu mgd}$, b) $v_0 = \sqrt{2\mu mgd}$, c) $v_0 = \sqrt{-2\mu gd}$, d) $v_0 = \sqrt{2\mu gd}$, e) $v_0 = \sqrt{2gd/\mu}$, f) $v_0 = \sqrt{2\mu md}$, g) $v_0 = \sqrt{2\mu d}$.

30. O Un caja permanece fija después de que se coloca sobre una rampa inclinada a un ángulo con la horizontal. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto acerca de la magnitud de la fuerza de fricción que actúa sobre la caja? Elija todos los que sean verdaderos. a) Es mayor que el peso de la caja. b) Es casi igual al peso de la caja. c) Es igual a $\mu_s n$. d) Es mayor que la componente de la fuerza gravitacional que actúa a lo largo de la rampa. e) Es igual la componente de la fuerza gravitacional que actúa a lo largo de la rampa. f) Es menor que la componente de la fuerza gravitacional que actúa hacia abajo de la rampa.

31. Suponga que usted maneja un auto clásico. ¿Por qué debe evitar pisar fuertemente los frenos cuando quiera detenerse en la menor distancia posible? (Muchos automóviles modernos tienen frenos antibloqueo que evitan este problema.)

32. Describa algunos ejemplos en que la fuerza de fricción que se ejerce sobre un objeto está en la dirección de movimiento del objeto.

33. O Como se muestra en la figura P5.33, el estudiante A, una niña de 55 kg, se sienta en una silla con patas metálicas, en reposo en el suelo del salón de clase. El estudiante B, un niño de 80 kg, se sienta en una silla idéntica. Ambos estudiantes mantienen sus pies alejados del suelo. Una cuerda corre de las manos de la estudiante A alrededor de una polea ligera hacia las manos del profesor que está de pie en el suelo junto a ella. El eje de baja fricción de la polea se une a una segunda cuerda que sostiene el estudiante B. Todas las cuerdas corren paralelas a las patas de las sillas. a) Si la estudiante A jala sobre su extremo de la cuerda, ¿su silla o la de B se deslizará sobre el suelo? b) Si en vez de ello el profesor jala sobre su extremo de cuerda, ¿cuál silla se desliza? c) Si el estudiante B jala su cuerda, ¿cuál silla se desliza? d) Ahora el profesor ata su extremo de cuerda a la silla de la estudiante A. La estudiante A jala el extremo de cuerda en sus manos. ¿Cuál silla se desliza? (Vern Rockcastle sugirió la idea para esta pregunta.)

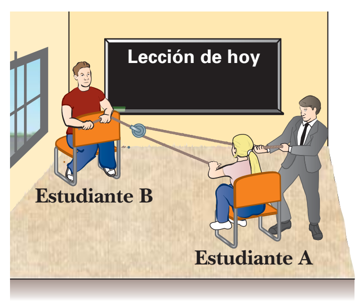


Figura P5.33

Problemas

Secciones de la 5.1 a la 5.6

1. Un objeto de 3.00 kg se somete a una aceleración conocida por $\vec{\mathbf{a}} = (2.00\hat{\mathbf{i}} + 5.00\hat{\mathbf{j}})$ m/s^2. Encuentre la fuerza resultante que actúa sobre él y la magnitud de la fuerza resultante.

2. Una fuerza $\vec{\mathbf{F}}$ aplicada a un objeto de masa m_1 produce una aceleración de 3.00 m/s^2. La misma fuerza aplicada a un segundo objeto de masa m_2 produce una aceleración de 1.00 m/s^2. a) ¿Cuál es el valor de la relación m_1/m_2? b) Si m_1 y m_2 se combinan en un objeto, ¿cuál es su aceleración bajo la acción de la fuerza $\vec{\mathbf{F}}$?

3. Para modelar una nave espacial, el motor de un cohete de juguete se sujeta firmemente a un gran disco que puede deslizar con fricción despreciable sobre una superficie horizontal, que se toma como plano *xy*. El disco de 4.00 kg tiene una velocidad de $(3.00\hat{\mathbf{i}}$ m/s en un instante. Ocho segundos después, su velocidad es $(8.00\hat{\mathbf{i}} + 10.0\hat{\mathbf{j}})$ m/s. Si supone que el motor de cohete ejerce una fuerza horizontal constante, encuentre a) las componentes de la fuerza y b) su magnitud.

4. La rapidez promedio de una molécula de nitrógeno en el aire es aproximadamente 6.70×10^2 m/s y su masa es 4.68×10^{-26} kg. a) Si una molécula de nitrógeno tarda 3.00×10^{-13} s en golpear una pared y rebotar con la misma rapidez pero moviéndose en la dirección opuesta, ¿cuál es la aceleración promedio de la molécula durante este intervalo de tiempo? b) ¿Qué fuerza promedio ejerce la molécula sobre la pared?

5. Un electrón de 9.11×10^{-31} kg de masa tiene una rapidez inicial de 3.00×10^5 m/s. Viaja en línea recta y su rapidez aumenta a 7.00×10^5 m/s en una distancia de 5.00 cm. Si supone que su aceleración es constante, a) determine la fuerza que se ejerce sobre el electrón y b) compare esta fuerza con el peso del electrón, que se ignoró.

6. Una mujer pesa 120 lb. Determine a) su peso en newtons y b) su masa en kilogramos.

7. La distinción entre masa y peso se descubrió después de que Jean Richer transportara relojes de péndulo de Francia a la Guayana Francesa en 1671. Encontró que sistemáticamente los relojes se mueven más lentos ahí. El efecto se invertía cuando los relojes regresaban a Francia. ¿Cuánto peso perdería usted cuando viajara de París, Francia, donde $g = 9.809\ 5$ m/s^2, a Cayena, Guayana Francesa, donde $g = 9.780\ 8$ m/s^2?

8. Además de su peso, un objeto de 2.80 kg está sometido a otra fuerza constante. El objeto parte del reposo y en 1.20 s experimenta un desplazamiento de $(4.20\hat{\mathbf{i}} - 3.30\hat{\mathbf{j}})$ m/s, donde la dirección de $\hat{\mathbf{j}}$ es la dirección vertical hacia arriba. Determine la otra fuerza.

9. Dos fuerzas $\vec{\mathbf{F}}_1$ y $\vec{\mathbf{F}}_2$ actúan sobre un objeto de 5.00 kg. Si toma $F_1 = 20.0$ N y $F_2 = 15.0$ N, encuentre las aceleraciones en a) y b) de la figura P5.9.

10. Se ejercen una o más fuerzas externas sobre cada objeto encerrado en un recuadro con líneas discontinuas en la figura 5.1. Identifique la reacción a cada una de dichas fuerzas.

11. Usted está de pie en el asiento de una silla y luego salta. a) Durante el intervalo de tiempo en el que está en vuelo hacia

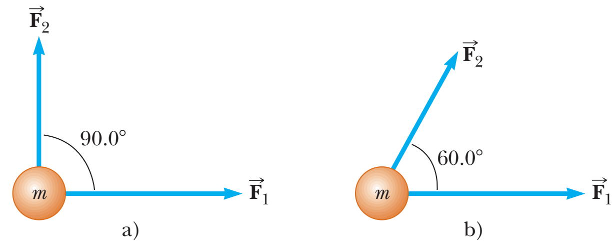


Figura P5.9

el suelo, la Tierra se tambalea hacia usted con una aceleración ¿de qué orden de magnitud? En su solución, explique su lógica. Represente a la Tierra como un objeto perfectamente sólido. b) La Tierra se mueve hacia arriba a través de una distancia ¿de qué orden de magnitud?

12. Un ladrillo de masa *M* está sobre una almohadilla de hule de masa *m*. Juntos se deslizan hacia la derecha con velocidad constante sobre un estacionamiento cubierto de hielo. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre del ladrillo e identifique cada fuerza que actúa sobre él. b) Dibuje un diagrama de cuerpo libre de la almohadilla e identifique cada fuerza que actúa sobre ella. c) Identifique todos los pares de fuerzas acción–reacción en el sistema ladrillo–almohadilla–planeta.

13. Un bloque de 15.0 lb descansa sobre el suelo. a) ¿Qué fuerza ejerce el suelo sobre el bloque? b) Una cuerda se ata al bloque y se mueve verticalmente sobre una polea. El otro extremo de la cuerda se une a un objeto de 10.0 lb que cuelga libre. ¿Cuál es la fuerza que ejerce el suelo sobre el bloque de 15.0 lb? c) Si se sustituye el objeto de 10.0 lb del inciso b) con un objeto de 20.0 lb, ¿cuál es la fuerza que ejerce el suelo sobre el bloque de 15.0 lb?

14. Tres fuerzas que actúan sobre un objeto se proporcionan por $\vec{\mathbf{F}}_1 = (-2.00\hat{\mathbf{i}} + 2.00\hat{\mathbf{j}})$ N, $\vec{\mathbf{F}}_2 = (5.00\hat{\mathbf{i}} - 3.00\hat{\mathbf{j}})$ N y $\vec{\mathbf{F}}_3$ $(-45.0\hat{\mathbf{i}})$ N. El objeto experimenta una aceleración de 3.75 m/s^2 de magnitud. a) ¿Cuál es la dirección de la aceleración? b) ¿Cuál es la masa del objeto? c) Si el objeto inicialmente está en reposo, ¿cuál es su rapidez después de 10.0 s? d) ¿Cuáles son las componentes de velocidad del objeto después de 10.0 s?

Sección 5.7 Algunas aplicaciones de las leyes de Newton

15. La figura P5.15 muestra un trabajador que empuja un bote, un modo de transporte muy eficiente, a través de un lago tranquilo. Empuja paralelo a la longitud de la pértiga ligera y ejerce sobre el fondo del lago una fuerza de 240 N. Suponga que la pértiga se encuentra en el plano vertical que contiene la quilla del bote. En algún momento, la pértiga forma un ángulo de 35.0° con la vertical y el agua ejerce una fuerza de arrastre horizontal de 47.5 N sobre el bote, opuesta a su velocidad hacia adelante de 0.857 m/s de magnitud. La masa del bote, que incluye su carga y al trabajador es de 370 kg. a) El agua ejerce una fuerza de flotación vertical hacia arriba sobre el bote. Encuentre la magnitud de esta fuerza. b) Modele las fuerzas como constantes en un intervalo corto de tiempo para encontrar la velocidad del bote 0.450 s después del momento descrito.

Figura P5.15

16. Un objeto de 3.00 kg es móvil en un plano, con sus coordenadas x y y conocidas mediante $x = 5t^2 - 1$ y $y = 3t^3 + 2$, donde x y y están en metros y t en segundos. Encuentre la magnitud de la fuerza neta que actúa en este objeto en $t = 2.00$ s.

17. La distancia entre dos postes de teléfono es de 50.0 m. Cuando un ave de 1.00 kg se posa sobre el alambre del teléfono a la mitad entre los postes, el alambre se comba 0.200 m. Dibuje un diagrama de cuerpo libre del ave. ¿Cuánta tensión produce el ave en el alambre? Ignore el peso del alambre.

18. Un tornillo de hierro de 65.0 g de masa cuelga de una cuerda de 35.7 cm de largo. El extremo superior de la cuerda está fijo. Sin tocarlo, un imán atrae el tornillo de modo que permanece fijo, desplazado horizontalmente 28.0 cm a la derecha desde la línea vertical previa de la cuerda. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre del tornillo. b) Encuentre la tensión en la cuerda. c) Encuentre la fuerza magnética sobre el tornillo.

19. ● La figura P5.19 muestra las fuerzas horizontales que actúan sobre un bote de vela que se mueve al norte con velocidad constante, visto desde un punto justo arriba de su mástil. A esta rapidez particular, el agua ejerce una fuerza de arrastre de 220 N sobre el casco del bote. a) Elija la dirección x como este y la dirección y como norte. Escriba dos ecuaciones que representen la segunda ley de Newton en componentes. Resuelva las ecuaciones para P (la fuerza que ejerce el viento sobre la vela) y para n (la fuerza que ejerce el agua sobre la quilla). b) Elija la dirección x como 40.0° al noreste y la dirección y como 40.0° al noroeste. Escriba la segunda ley de Newton como dos ecuaciones en la forma componentes y resuelva para n y P. c) Compare sus soluciones. ¿Los resultados concuerdan? ¿Un cálculo es significativamente más sencillo?

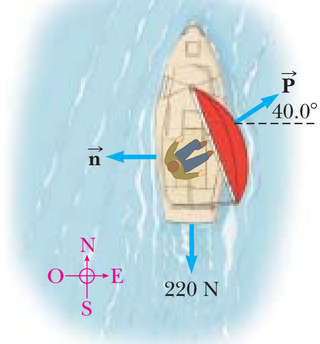


Figura P5.19

20. Un saco de cemento de 325 N de peso cuelga en equilibrio de tres alambres, como se muestra en la figura P5.20. Dos de los alambres forman ángulos $\theta_1 = 60.0°$ y $\theta_2 = 25.0°$ con la horizontal. Si supone que el sistema está en equilibrio, encuentre las tensiones T_1, T_2 y T_3 en los alambres.

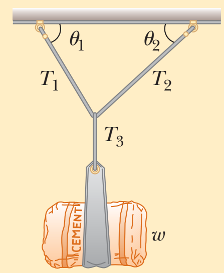


Figura P5.20 Problemas 20 y 21.

21. Un saco de cemento de peso F_g cuelga en equilibrio de tres alambres, como se muestra en la figura P5.20. Dos de los alambres forman ángulos θ_1 y θ_2 con la horizontal. Si supone que el sistema está en equilibrio, demuestre que la tensión en el alambre izquierdo es

$$T_1 = \frac{F_g \cos \theta_2}{\operatorname{sen}(\theta_1 + \theta_2)}$$

22. ● Usted es juez en un torneo infantil de volar papalotes, donde dos niños ganarán premios, uno para la cuerda del papalote que jale con más intensidad y el otro para el que jale con menos intensidad. Para medir las tensiones en las cuerdas, pide prestado a su profesor de física un soporte para colgar contrapeso, algunas pesas ranuradas y un transportador, y aplica el siguiente protocolo, como se ilustra en la figura P5.22. Espera a que un niño tenga bien controlado su papalote, coloca el soporte en la cuerda del papalote aproximadamente a 30 cm de la mano del niño, apila las pesas ranuradas hasta que la sección de cuerda esté horizontal, registra las pesas requeridas y el ángulo entre la horizontal y la cuerda que va al papalote. a) Explique cómo funciona este método. Mientras construye su explicación, imagine que los padres del niño le preguntan acerca de su método, al parecer tienen falsas conjeturas acerca de su habilidad sin evidencias concretas, y su explicación es una oportunidad para darles confianza en su técnica de evaluación. b) Encuentre la tensión de la cuerda si la masa es 132 g y el ángulo de la cuerda del papalote es 46.3°.

Figura P5.22

23. Los sistemas que se muestran en la figura P5.23 están en equilibrio. Si las balanzas de resorte se calibran en newtons, ¿qué lectura indica en cada caso? Ignore las masas de las poleas y cuerdas, y suponga que las poleas y el plano inclinado en el inciso d) no tienen fricción.

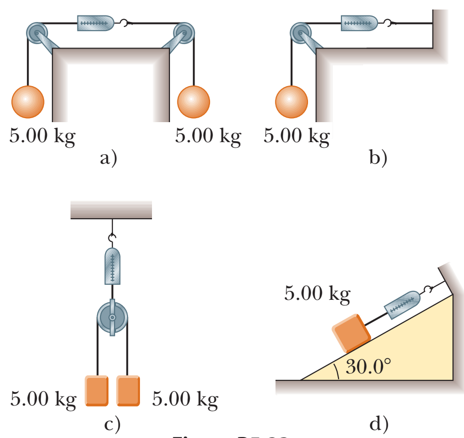


Figura P5.23

24. Dibuje un diagrama de cuerpo libre de un bloque que se desliza hacia abajo por un plano sin fricción que tiene una inclinación $\theta = 15.0°$. El bloque parte del reposo en lo alto, y la longitud del plano es 2.00 m. Encuentre a) la aceleración del bloque y b) su rapidez cuando llega al fondo del plano inclinado.

25. Se observa que un objeto de 1.00 kg tiene una aceleración de 10.0 m/s^2 en una dirección a 60.0° al noreste (figura P5.25). La fuerza $\vec{\mathbf{F}}_2$ que se ejerce sobre el objeto tiene una magnitud de 5.00 N y se dirige al norte. Determine la magnitud y dirección de la fuerza $\vec{\mathbf{F}}_1$ que actúa sobre el objeto.

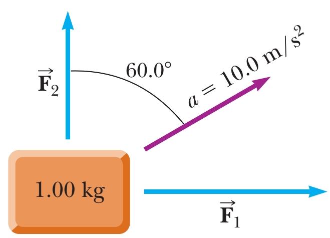


Figura P5.25

26. Un objeto de 5.00 kg colocado sobre una mesa horizontal sin fricción se conecta a una cuerda que pasa sobre una polea y después se une a un objeto colgante de 9.00 kg, como se muestra en la figura P5.26. Dibuje diagramas de cuerpo libre de ambos objetos. Encuentre la aceleración de los dos objetos y la tensión en la cuerda.

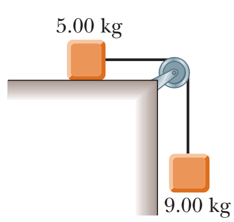


Figura P5.26 Problemas 26 y 41.

27. La figura P5.27 muestra la rapidez del cuerpo de una persona mientras hace unas barras. Suponga que el movimiento es vertical y que la masa del cuerpo de la persona es 64.0 kg. Determine la fuerza que ejerce la barra sobre cuerpo en el tiempo a) cero, b) 0.5 s, c) 1.1 s y d) 1.6 s.

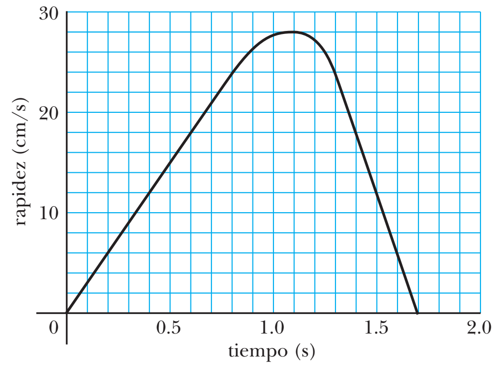


Figura P5.27

28. Dos objetos se conectan mediante una cuerda ligera que pasa sobre una polea sin fricción, como se muestra en la figura P5.28. Dibuje diagramas de cuerpo libre de ambos objetos. Si supone que el plano no tiene fricción, $m_1 = 2.00$ kg, $m_2 = 6.00$ kg y $\theta = 55.0°$, encuentre a) las aceleraciones de los objetos, b) la tensión en la cuerda y c) la rapidez de cada objeto 2.00 s después de que se liberan desde el reposo.

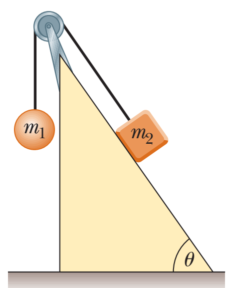


Figura P5.28

29. A un bloque se le da una velocidad inicial de 5.00 m/s hacia arriba de un plano inclinado de 20.0° sin fricción. ¿Hasta donde se desliza el bloque hacia arriba del plano antes de llegar al reposo?

30. En la figura P5.30, el hombre y la plataforma juntos pesan 950 N. La polea se puede modelar sin fricción. Determine cuán fuerte tiene que jalar de la cuerda el hombre para elevarse a sí mismo de manera estable hacia arriba sobre el suelo. (¿O es imposible? Si es así, explique por qué.)

Figura P5.30

31. En el sistema que se muestra en la figura P5.31, una fuerza horizontal $\vec{\mathbf{F}}_x$ actúa sobre el objeto de 8.00 kg. La superficie horizontal no tiene fricción. Examine la aceleración del objeto deslizante como una función de F_x. a) ¿Para qué valores de F_x el objeto de 2.00 kg acelera hacia arriba? b) ¿Para qué valores de F_x la tensión en la cuerda es cero? c) Grafique la aceleración del objeto de 8.00 kg en función de F_x. Incluya valores de F_x desde -100 N hasta $+100$ N.

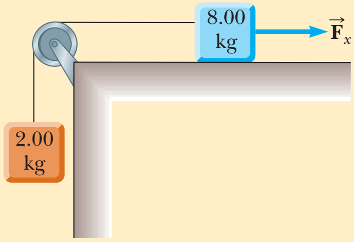


Figura P5.31

32. Un objeto de masa m_1 sobre una mesa horizontal sin fricción se conecta a un objeto de masa m_2 por medio de una polea muy ligera P_1 y una polea fija ligera P_2, como se muestra en la figura P5.32. a) Si a_1 y a_2 son las aceleraciones de m_1 y m_2, respectivamente, ¿cuál es la relación entre dichas aceleraciones? Exprese b) las tensiones en las cuerdas y c) las aceleraciones a_1 y a_2 en términos de g y de las masas m_1 y m_2.

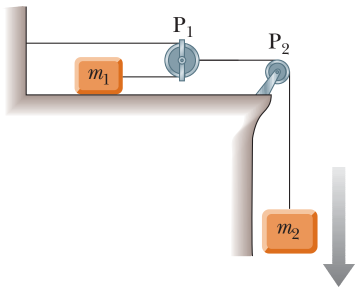


Figura P5.32

33. Un hombre de 72.0 kg está de pie sobre una báscula de resorte en un elevador. A partir del reposo, el elevador asciende y logra su rapidez máxima de 1.20 m/s en 0.800 s. Viaja con esta rapidez constante durante los siguientes 5.00 s. En tal caso el elevador se somete a una aceleración uniforme en la dirección y negativa durante 1.50 s y llega al reposo. ¿Qué registra la báscula a) antes de que el elevador comience a moverse, b) durante los primeros 0.800 s, c) mientras el elevador viaja con rapidez constante y d) durante el intervalo de tiempo que disminuye su velocidad?

34. En la máquina de Atwood que se muestra en la figura 5.14a, $m_1 = 2.00$ kg y $m_2 = 7.00$ kg. Las masas de la polea y la cuerda son despreciables si se les compara. La polea gira sin fricción y la cuerda no se estira. El objeto más ligero se libera con un empujón rápido que lo pone en movimiento a $v_i = 2.40$ m/s hacia abajo. a) ¿Qué distancia descenderá m_1 abajo de su nivel inicial? b) Encuentre la velocidad de m_1 después de 1.80 segundos.

Sección 5.8 Fuerzas de fricción

35. Un automóvil viaja a 50.0 mi/h en una autopista. a) Si el coeficiente de fricción estática entre camino y llantas en un día lluvioso es 0.100, ¿cuál es la distancia mínima en la que el automóvil se detendrá? b) ¿Cuál es la distancia de frenado cuando la superficie está seca y $\mu_s = 0.600$?

36. Un bloque de 25.0 kg al inicio está en reposo sobre una superficie horizontal. Se requiere una fuerza horizontal de 75.0 N para poner al bloque en movimiento, después de la cual se requiere una fuerza horizontal de 60.0 N para mantener al bloque en movimiento con rapidez constante. Hallar los coeficientes de fricción estática y cinética a partir de esta información.

37. Su libro de física de 3.80 kg está junto a usted sobre el asiento horizontal de su automóvil. El coeficiente de fricción estática entre el libro y el asiento es 0.650, y el coeficiente de fricción cinética es 0.550. Suponga que viaja a 72.0 km/h = 20.0 m/s y frena hasta detenerse sobre una distancia de 45.0 m. a) ¿El libro comenzará a deslizarse sobre el asiento? b) ¿Qué fuerza ejerce el asiento sobre el libro en este proceso?

38. ● Antes de 1960, se creía que el máximo coeficiente de fricción estática alcanzable para la llanta de un automóvil era menor que 1. Después, alrededor de 1962, tres compañías desarrollaron, cada una, llantas de carreras con coeficientes de 1.6. Desde aquella ocasión, las llantas se han mejorado, como se ilustra en este problema. De acuerdo con el *Libro de récords Guinness* de 1990, el intervalo de tiempo más rápido para un automóvil con motor de pistones inicialmente en reposo para cubrir una distancia de un cuarto de milla es 4.96 s. Shirley Muldowney estableció este récord en septiembre de 1989. a) Suponga que las llantas traseras levantaron las delanteras del pavimento, como se muestra en la figura P5.38. ¿Qué valor mínimo de μ_s es necesario para lograr el intervalo de tiempo récord? b) Suponga que Muldowney tenía posibilidad de duplicar la potencia de su motor, y mantener otras cosas iguales. ¿Cómo afectaría este cambio al intervalo de tiempo?

Jaime Squire/Allsport/Getty Images

Figura P5.38

39. Un bloque de 3.00 kg parte del reposo en lo alto de un plano inclinado 30.0° y se desliza una distancia de 2.00 m hacia abajo por el plano en 1.50 s. Encuentre a) la magnitud de la aceleración del bloque, b) el coeficiente de fricción cinética entre el bloque y el plano, c) la fuerza de fricción que actúa sobre el bloque y d) la rapidez del bloque después de deslizar 2.00 m.

40. Una mujer en un aeropuerto jala su maleta de 20.0 kg con rapidez constante al jalar de una correa en un ángulo θ sobre la horizontal (figura P5.40). Ella jala de la correa con una fuerza de 35.0 N. La fuerza de fricción sobre la maleta es 20.0 N. Dibuje un diagrama de cuerpo libre de la maleta. a) ¿Qué ángulo forma la correa con la horizontal? b) ¿Qué fuerza normal ejerce el suelo sobre la maleta?

Figura P5.40

41. Un objeto suspendido de 9.00 kg se conecta, mediante una cuerda ligera inextensible sobre una polea ligera sin fricción, a un bloque de 5.00 kg que se desliza sobre una mesa plana (figura P5.26). Si toma el coeficiente de fricción cinética como 0.200, encuentre la tensión en la cuerda.

42. Tres objetos se conectan sobre una mesa como se muestra en la figura P5.42. La mesa rugosa tiene un coeficiente de fricción cinética de 0.350. Los objetos tienen masas de 4.00 kg, 1.00 kg y 2.00 kg, como se muestra, y las poleas no tienen fricción. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para cada objeto. a) Determine la aceleración de cada objeto y sus direcciones. b) Determine las tensiones en las dos cuerdas.

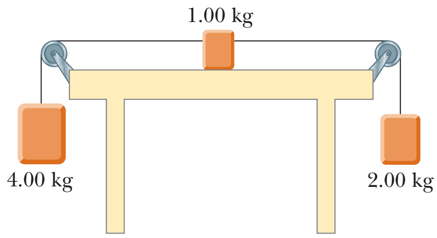


Figura P5.42

43. Dos bloques unidos mediante una cuerda de masa despreciable se arrastran mediante una fuerza horizontal (figura P5.43). Suponga que $F = 68.0$ N, $m_1 = 12.0$ kg, $m_2 = 18.0$ kg y el coeficiente de fricción cinética entre cada bloque y la superficie es 0.100. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para cada bloque. b) Determine la tensión T y la magnitud de la aceleración del sistema.

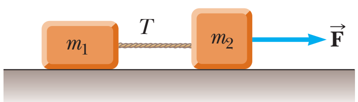


Figura P5.43

44. ● Un bloque de 3.00 kg de masa es empujado contra una pared mediante una fuerza $\vec{\mathbf{P}}$ que forma un ángulo $\theta = 50.0°$ con la horizontal, como se muestra en la figura P5.44. El coeficiente de fricción estática entre el bloque y la pared es 0.250. a) Determine los valores posibles para la magnitud de $\vec{\mathbf{P}}$ que permiten al bloque permanecer fijo. b) Describa qué sucede si $|\vec{\mathbf{P}}|$ tiene un valor mayor y qué ocurre si es más pequeño. c) Repita los incisos a) y b) suponiendo que la fuerza forma un ángulo $\theta = 13.0°$ con la horizontal.

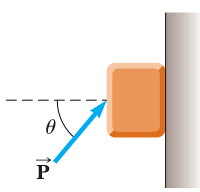


Figura P5.44

45. ● Un bloque de 420 kg está en reposo sobre una superficie horizontal. El coeficiente de fricción estática entre el bloque y la superficie es 0.720, y el coeficiente de fricción cinética es 0.340. Una fuerza de magnitud P empuja el bloque hacia adelante y abajo como se muestra en la figura P5.45. Suponga que la fuerza se aplica a un ángulo de 37.0° bajo la horizontal. a) Encuentre la aceleración del bloque como función de P. b) Si $P = 5.00$ N, encuentre la aceleración y la fuerza de fricción que se ejerce sobre el bloque. c) Si $P = 10.0$ N, encuentre la aceleración y la fuerza de fricción que se ejerce sobre el bloque. d) De palabra describa cómo depende la aceleración relacionada con P. ¿Existe una aceleración mínima definida para el bloque? Si es así, ¿cuál es? ¿Existe un máximo definido?

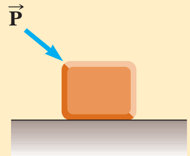


Figura P5.45

46. **Problema de repaso.** Un lado del techo de un edificio se eleva a 37.0°. Un estudiante lanza un frisbee hacia el techo. Golpea con una rapidez de 15.0 m/s, no rebota y luego se desliza en línea recta hacia arriba del plano inclinado. El coeficiente de fricción cinética entre el plástico y el techo es 0.400. El frisbee se desliza 10.0 m hacia arriba del techo hasta su pico, donde entra en caída libre siguiendo una trayectoria parabólica con resistencia de aire despreciable. Determine la altura máxima que el frisbee alcanza arriba del punto donde golpeó al techo.

47. La tabla entre otras dos tablas en la figura P5.47 pesa 95.5 N. Si el coeficiente de fricción entre los tableros es 0.663, ¿cuál debe ser la magnitud de las fuerzas de compresión (supuestas horizontales) que actúan sobre ambos lados del tablero central para evitar que se deslice?

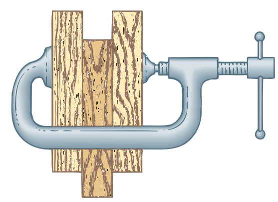


Figura P5.47

48. Un mago jala un mantel de abajo de una taza de 200 g ubicada a 30.0 cm del borde de la mesa. El mantel ejerce una fuerza de fricción de 0.100 N sobre la taza y el mantel se jala con una aceleración constante de 3.00 m/s^2. ¿Cuánto se mueve la taza en relación con la mesa horizontal antes de que el mantel esté completamente afuera debajo de ella? Note que el mantel debe moverse más de 30 cm en relación con la mesa durante el proceso.

49. ● Un paquete de platos (60.0 kg de masa) se asienta en la plataforma de una camioneta pickup con una compuerta abierta. El coeficiente de fricción estática entre el paquete y la plataforma de la camioneta es 0.300, y el coeficiente de fricción cinética es 0.250. a) La camioneta acelera hacia adelante sobre suelo a nivel. ¿Cuál es la aceleración máxima que puede tener la camioneta de modo que el paquete no se deslice en relación con la plataforma de la camioneta? b) Apenas la camioneta supera esta aceleración y enseguida se mueve con aceleración constante, con el paquete deslizándose a lo largo de su plataforma. ¿Cuál es la aceleración del paquete en relación con el suelo? c) El conductor limpia los fragmentos de platos y comienza de nuevo con un paquete idéntico con la camioneta en reposo. La camioneta acelera sobre una colina inclinada a

10.0° con la horizontal. ¿Ahora cuál es la aceleración máxima que puede tener la camioneta tal que el paquete no se deslice en relación con la plataforma? d) Cuando la camioneta supera esta aceleración, ¿cuál es la aceleración del paquete en relación con el suelo? e) Para la camioneta estacionada en reposo sobre una colina, ¿cuál es la pendiente máxima que puede tener la colina tal que el paquete no se deslice? f) ¿Alguna pieza de datos es innecesaria para la solución en todas los incisos de este problema? Explique.

Problemas adicionales

50. Las siguientes ecuaciones describen el movimiento de un sistema de dos objetos:

$$+n - (6.50\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2)\cos 13.0° = 0$$

$$f_k = 0.360n$$

$$+T + (6.50\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2)\text{ sen } 13.0° - f_k = (6.50\text{ kg})a$$

$$-T + (3.80\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2) = (3.80\text{ kg})a$$

a) Resuelva las ecuaciones para a y T. b) Describa una situación a la que se apliquen estas ecuaciones. Dibuje diagramas de cuerpo libre para ambos objetos.

51. Un niño inventivo llamado Niels quiere alcanzar una manzana pendiente en un árbol sin escalar. Sentado en una silla unida a una soga que pasa sobre una polea sin fricción (figura P5.51), Niels jala sobre el extremo suelto de la soga con tal fuerza que la balanza de resorte lee 250 N. El verdadero peso de Niels es 320 N y la silla pesa 160 N. a) Dibuje diagramas de cuerpo libre para Niels y la silla considerada como sistemas separados, y otro diagrama para Niels y la silla considerados como un sistema. b) Muestre que la aceleración del sistema es *hacia arriba* y encuentre su magnitud. c) Encuentre la fuerza que Niels ejerce sobre la silla.

Figura P5.51 Problemas 51 y 52.

52. ● En la situación descrita en el problema 51 y la figura P5.51, las masas de la soga, balanza y polea son despreciables. Los pies de Niels no tocan el suelo. a) Suponga que Niels está momentáneamente en reposo cuando deja de jalar la soga hacia abajo y pasa el extremo de la soga a otro niño, de 440 N de peso, que está de pie en el suelo junto a él. La soga no se rompe. Describa el movimiento resultante. b) En vez de ello, suponga que Niels está momentáneamente en reposo cuando amarra el extremo de la soga a una saliente en forma de gancho resistente que se deriva del tronco del árbol. Explique por qué esta acción puede hacer que la cuerda se rompa.

53. Una fuerza dependiente del tiempo, $\vec{\mathbf{F}} = (8.00\hat{\mathbf{i}} - 4.00t\hat{\mathbf{j}})$ N, donde t está en segundos, se ejerce sobre un objeto de 2.00 kg inicialmente en reposo. a) ¿En qué tiempo el objeto se moverá con una rapidez de 15.0 m/s? b) ¿A qué distancia está el objeto de su posición inicial cuando su rapidez es 15.0 m/s? c) ¿A través de qué desplazamiento total el objeto viajó en este momento?

54. ● Tres bloques están en contacto mutuo sobre una superficie horizontal sin fricción, como se muestra en la figura P5.54. A m_1 se le aplica una fuerza horizontal $\vec{\mathbf{F}}$. Tome $m_1 = 2.00$ kg, $m_2 = 3.00$ kg, $m_3 = 4.00$ kg y $F = 18.0$ N. Dibuje un diagrama de cuerpo libre por separado para cada bloque y encuentre a) la aceleración de los bloques, b) la fuerza *resultante* sobre cada bloque y c) las magnitudes de las fuerzas de contacto entre los bloques. d) Usted trabaja en un proyecto de construcción. Un colaborador clava cartón–yeso en un lado de un separador ligero y usted está en el lado opuesto, proporcionando "respaldo" al apoyarse contra la pared con su espalda, empujando sobre ella. Cada golpe de martillo hace que su espalda sufra un pinchazo. El supervisor lo ayuda al poner un pesado bloque de madera entre la pared y su espalda. Use la situación analizada en los incisos a), b) y c) como modelo, y explique cómo este cambio funciona para hacer su trabajo más confortable.

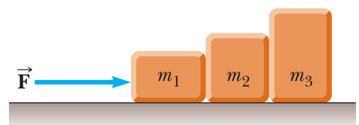


Figura P5.54

55. ● Una soga con masa m_1 se une al borde frontal inferior de un bloque con 4.00 kg de masa. Tanto la soga como el bloque están en reposo sobre una superficie horizontal sin fricción. La soga no se estira. El extremo libre de la soga se jala con una fuerza horizontal de 12.0 N. a) Encuentre la aceleración del sistema, como dependiente de m_1. b) Encuentre la magnitud de la fuerza que ejerce la soga sobre el bloque, como dependiente de m_1. c) Evalúe la aceleración y la fuerza sobre el bloque para $m_1 = 0.800$ kg. *Sugerencia:* Puede encontrar más fácil hacer el inciso c) antes que los incisos a) y b).

¿Qué pasaría si? d) ¿Qué ocurre a la fuerza sobre el bloque mientras la masa de la soga crece más allá de todo límite? e) ¿Qué ocurre a la fuerza sobre el bloque conforme la masa de la soga tiende a cero? f) ¿Qué teorema puede establecer acerca de la tensión en una cuerda *ligera* que une un par de objetos en movimiento?

56. Un deslizador de aluminio negro flota sobre una película de aire en una pista de aire de aluminio a nivel. En esencia, el aluminio no siente fuerza en un campo magnético y la resistencia del aire es despreciable. Un imán intenso se une a lo alto del deslizador y forma una masa total de 240 g. Un trozo de chatarra de hierro unido a un tope en la pista atrae al imán con una fuerza de 0.823 N cuando el hierro y el imán están separados 2.50 cm. a) Encuentre la aceleración del deslizador en este instante. b) La chatarra de hierro ahora se une a otro deslizador verde y forma una masa total de 120 g. Encuentre la aceleración de cada deslizador cuando se liberan simultáneamente a 2.50 cm de separación.

57. Un objeto de masa M se mantiene en lugar mediante una fuerza aplicada $\vec{\mathbf{F}}$ y un sistema de polea como se muestra en la figura P5.57. Las poleas no tienen masa ni fricción. Encuentre a) la tensión en cada sección de cuerda, T_1, T_2, T_3, T_4 y T_5 y b) la magnitud de $\vec{\mathbf{F}}$. *Sugerencia:* Dibuje un diagrama de cuerpo libre para cada polea.

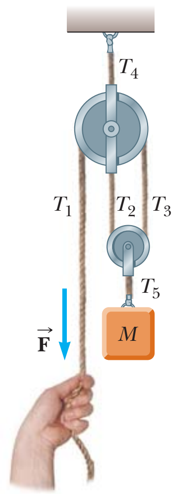


Figura P5.57

58. ● Un bloque de 2.20 kg de masa se acelera a través de una superficie rugosa mediante una cuerda ligera que pasa sobre una pequeña polea, como se muestra en la figura P5.58. La tensión T en la cuerda se mantiene en 10.0 N y la polea está a 0.100 m sobre la cara superior del bloque. El coeficiente de fricción cinética es 0.400. a) Determine la aceleración del bloque cuando $x = 0.400$ m. b) Describa el comportamiento general de la aceleración conforme el bloque se desliza desde una posición donde x es mayor que $x = 0$. c) Encuentre el valor máximo de la aceleración y la posición x para la que ocurre. d) Encuentre el valor de x para el que la aceleración es cero.

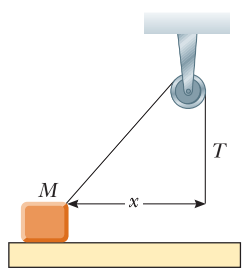


Figura P5.58

59. ● Estudiantes de física universitarios quedaron en primero y segundo lugares en un concurso y están en los muelles, observando cómo descargan sus premios de un contenedor. En un solo cable vertical ligero que no se estira, una grúa levanta un Ferrari de 1 207 kg y, bajo él, un BMW Z8 rojo de 1 461 kg. El Ferrari se mueve hacia arriba con 3.50 m/s de rapidez y 1.25 m/s^2 de aceleración. a) ¿Cómo se comparan la velocidad y la aceleración del BMW con las del Ferrari? b) Encuentre la tensión en el cable entre el BMW y el Ferrari. c) Encuentre la tensión en el cable sobre el Ferrari. d) En el modelo, ¿cuál es la fuerza total que se ejerce sobre la sección de cable entre los autos? ¿Qué velocidad predice para ella 0.01 s en lo sucesivo? Explique el movimiento de esta sección de cable en términos de causa y efecto.

60. Un bloque de aluminio de 2.00 kg y un bloque de cobre de 6.00 kg se conectan mediante una cuerda ligera sobre una polea sin fricción. Se asientan sobre una superficie de acero, como se muestra en la figura P5.60, donde $\theta = 30.0°$. Cuando se liberan desde el reposo, ¿comenzarán a moverse? Si es así, determine a) su aceleración y b) la tensión en la cuerda. Si no, determine la suma de las magnitudes de las fuerzas de fricción que actúan sobre los bloques.

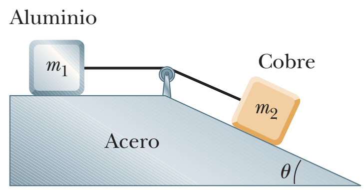


Figura P5.60

61. Una caja de peso F_g es empujada mediante una fuerza $\vec{\mathbf{P}}$ sobre un piso horizontal. a) El coeficiente de fricción estática es μ_s, y $\vec{\mathbf{P}}$ se dirige a un ángulo θ bajo la horizontal. Muestre que el valor mínimo de P que moverá la caja está dado por

$$P = \frac{\mu_s F_g \sec\theta}{1 - \mu_s \tan\theta}$$

b) Encuentre el valor mínimo de P que puede producir movimiento cuando $\mu_s = 0.400$, $F_g = 100$ N y $\theta = 0°$, 15.0°, 30.0°, 45.0° y 60.0°.

62. **Problema de repaso.** Un bloque de masa $m = 2.00$ kg se libera desde el reposo en $h = 0.500$ m sobre la superficie de una mesa, en lo alto de un plano inclinado de $\theta = 30.0°$, como se muestra en la figura P5.62. El plano sin fricción está fijo sobre una mesa de altura $H = 2.00$ m. a) Determine la aceleración del bloque mientras se desliza por el plano. b) ¿Cuál es la velocidad del bloque cuando deja el plano? c) ¿A qué distancia de la mesa el bloque golpeará el suelo? d) ¿Qué intervalo de tiempo transcurre entre la liberación del bloque y su golpe en el suelo? e) ¿La masa del bloque afecta alguno de los cálculos anteriores?

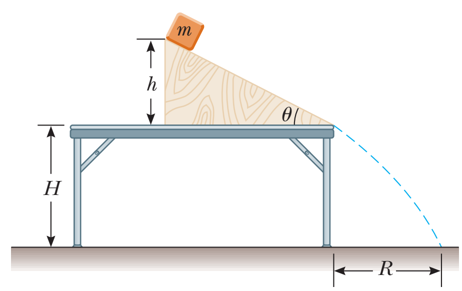


Figura P5.62 Problemas 62 y 68.

63. ● Un cojín neumático de masa m se libera desde el reposo en lo alto de un edificio que tiene altura h. Un viento que sopla a lo largo del lado del edificio ejerce una fuerza horizontal constante de magnitud F sobre el cojín conforme cae, como se muestra en la figura P5.63. El aire no ejerce fuerza vertical. a) Demuestre que la trayectoria del cojín es una línea recta. b) ¿El cojín cae con velocidad constante? Explique. c) Si $m = 1.20$ kg,

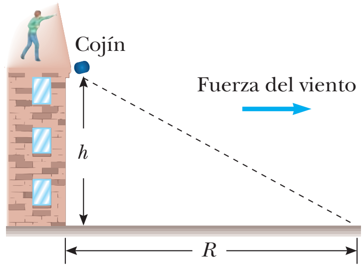


Figura P5.63

$h = 8.00$ m y $F = 2.40$ N, ¿a qué distancia del edificio el cojín golpeará el nivel del suelo? **¿Qué sucedería...?** d) Si el cojín se lanza hacia abajo con una rapidez distinta de cero, desde lo alto del edificio, ¿cuál será la forma de su trayectoria? Explique.

64. A un estudiante se le pide medir la aceleración de un carretón sobre un plano inclinado "sin fricción", como se muestra en la figura 5.11, con el uso de una pista de aire, un cronómetro y una regleta graduada. La altura del plano se mide en 1.774 cm, y la longitud total del plano se mide en $d = 127.1$ cm. Por tanto, el ángulo de inclinación θ se determina a partir de la relación sen $\theta = 1.774/127.1$. El carretón se libera desde el reposo en lo alto del plano y su posición x a lo largo del plano se mide como función del tiempo, donde $x = 0$ se refiere a la posición inicial del automóvil. Para valores x de 10.0 cm, 20.0 cm, 35.0 cm, 50.0 cm, 75.0 cm y 100 cm, los tiempos medidos a los que se alcanzan estas posiciones (promediados sobre cinco corridas) son 1.02 s, 1.53 s, 2.01 s, 2.64 s, 3.30 s y 3.75 s, respectivamente. Construya una gráfica de x contra t^2 y realice a los datos un ajuste lineal por mínimos cuadrados. Determine la aceleración del carretón a partir de la pendiente de esta gráfica y compárela con el valor que obtendría al usar $a = g$ sen θ, donde $g = 9.80$ m/s^2.

65. Una tostadora de 1.30 kg no está conectada. El coeficiente de fricción estática entre la tostadora y un mostrador horizontal es 0.350. Para hacer que la tostadora comience a moverse, usted jala descuidadamente su cordón eléctrico. a) para que la tensión en el cordón sea tan pequeña como sea posible, ¿en qué ángulo sobre la horizontal debe jalar? b) Con este ángulo, ¿qué tan grande debe ser la tensión?

66. ● En la figura P5.66, las poleas y las cuerdas son ligeras, todas las superficies son sin fricción y las cuerdas no se estiran. a) ¿Cómo se compara la aceleración del bloque 1 con la aceleración del bloque 2? Explique su razonamiento. b) La masa del bloque 2 es 1.30 kg. Encuentre su aceleración dependiente de la masa m_1 del bloque 1. c) Evalúe su respuesta para $m_1 = 0.550$ kg. *Sugerencia:* Puede encontrar más fácil hacer el inciso c) antes que el inciso b). **¿Qué sucedería...?** d) ¿Qué predice el resultado del inciso b) si m_1 es mucho menor que 1.30 kg? e) ¿Qué predice el resultado del inciso b) si m_1 tiende a infinito? f) ¿Cuál es la tensión en la cuerda larga en este último caso? g) ¿Podría anticipar las respuestas d), e) y f) sin hacer primero el inciso b)? Explique.

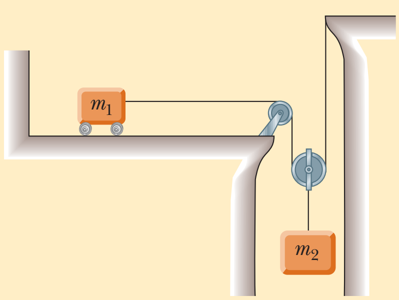


Figura P5.66

67. ¿Qué fuerza horizontal se debe aplicar al automóvil que se muestra en la figura P5.67 de modo que los bloques permanezcan fijos en relación con el carretón? Suponga que todas las superficies, ruedas y poleas no tienen fricción. Observe que la fuerza que ejerce la cuerda acelera m_1.

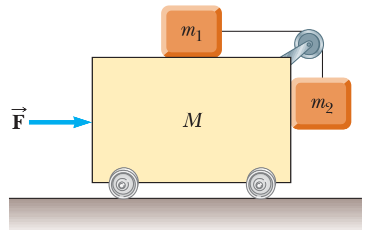


Figura P5.67

68. En la figura P5.62, el plano inclinado tiene masa M y se une a la mesa horizontal fija. El bloque de masa m se coloca cerca del fondo del plano y se libera con un rápido empujón que lo hace deslizar hacia arriba. El bloque se detiene cerca de lo alto del plano, como se muestra en la figura, y luego se desliza hacia abajo de nuevo, siempre sin fricción. Encuentre la fuerza que la mesa ejerce sobre el plano a lo largo de este movimiento.

69. Una van acelera hacia bajo de una colina (figura P5.69), y va desde el reposo a 30.0 m/s en 6.00 s. Durante la aceleración, un juguete ($m = 0.100$ kg) cuelga mediante una cuerda del techo de la van. La aceleración es tal que la cuerda permanece perpendicular al techo. Determine a) el ángulo θ y b) la tensión en la cuerda.

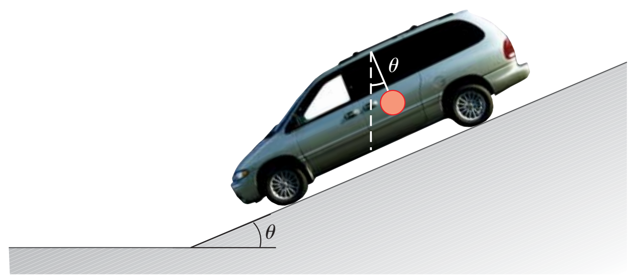


Figura P5.69

70. Un objeto de 8.40 kg se desliza hacia abajo por un plano inclinado fijo sin fricción. Use una computadora para determinar y tabular la fuerza normal que se ejerce sobre el objeto y su aceleración para una serie de ángulos de inclinación (medidos desde la horizontal) que varían de 0° a 90° en incrementos de 5°. Trace una gráfica de la fuerza normal y la aceleración como funciones del ángulo de inclinación. En los casos límite de 0° y 90°, ¿sus resultados son consistentes con el comportamiento conocido?

71. Un móvil se forma al soportar cuatro mariposas metálicas de igual masa m de una cuerda de longitud L. Los puntos de soporte están igualmente espaciados una distancia ℓ, como se muestra en la figura P5.71. La cuerda forma un ángulo θ_1 con el techo en cada punto final. La sección central de la cuerda es horizontal. a) Encuentre la tensión en cada sección de cuerda en términos de θ_1, m y g. b) Encuentre el ángulo θ_2, en términos de θ_1, que las secciones de cuerda entre las mariposas exteriores y las mariposas interiores forman con la horizontal. c) Demuestre que la distancia D entre los puntos extremos de la cuerda es

$$D = \frac{L}{5}\left(2\cos\theta_1 + 2\cos\left[\tan^{-1}\left(\tfrac{1}{2}\tan\theta_1\right)\right] + 1\right)$$

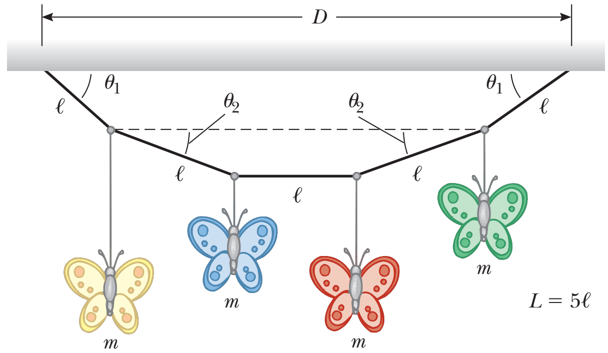


Figura P5.71

Respuestas a las preguntas rápidas

5.1 d). La opción a) es verdadera. La primera ley de Newton dice que el movimiento no requiere fuerza: un objeto en movimiento continúa moviéndose a velocidad constante en ausencia de fuerzas externas. La opción b) también es verdadera. Un objeto fijo puede tener muchas fuerzas actuando sobre él, pero si la suma vectorial de todas estas fuerzas externas es cero, no hay fuerza neta y el objeto permanece fijo.

5.2 a). Si actúa una sola fuerza, esta fuerza constituye la fuerza neta y existe una aceleración de acuerdo con la segunda ley de Newton.

5.3 d). Con el doble de fuerza, el objeto experimentará el doble de aceleración. Puesto que la fuerza es constante, la aceleración es constante, y la rapidez del objeto (que parte del reposo) está dada por $v = at$. Con el doble de aceleración, el objeto llegará a la rapidez v en la mitad de tiempo.

5.4 b). Puesto que el valor de g es más pequeño en la Luna que en la Tierra, se requeriría más masa de oro para representar 1 newton de peso en la Luna. Por lo tanto, su amigo en la Luna es más rico, ¡por un factor aproximado de 6!

5.5 **i)**, c). En concordancia con la tercera ley de Newton, la mosca y el autobús experimentan fuerzas que son iguales en magnitud pero opuestas en dirección. **ii)**, a). Puesto que la mosca tiene una masa mucho muy pequeña, la segunda ley de Newton dice que experimenta una aceleración muy grande. La gran masa del autobús significa que resiste más efectivamente cualquier cambio en su movimiento y muestra una aceleración pequeña.

5.6 b). La fuerza de fricción actúa opuesta a la fuerza gravitacional sobre el libro para mantenerlo en equilibrio. Puesto que la fuerza gravitacional es hacia abajo, la fuerza de fricción debe ser hacia arriba.

5.7 b). Cuando se jala con la soga, hay una componente de su fuerza aplicada que es hacia arriba, lo que reduce la fuerza normal entre el trineo y la nieve. A su vez, la fuerza de fricción entre el trineo y la nieve se reduce, lo que hace que el trineo sea más fácil de mover. Si usted empuja por detrás con una fuerza con un componente hacia abajo, la fuerza normal es mayor, la fuerza de fricción es más grande y el trineo es más difícil de mover.