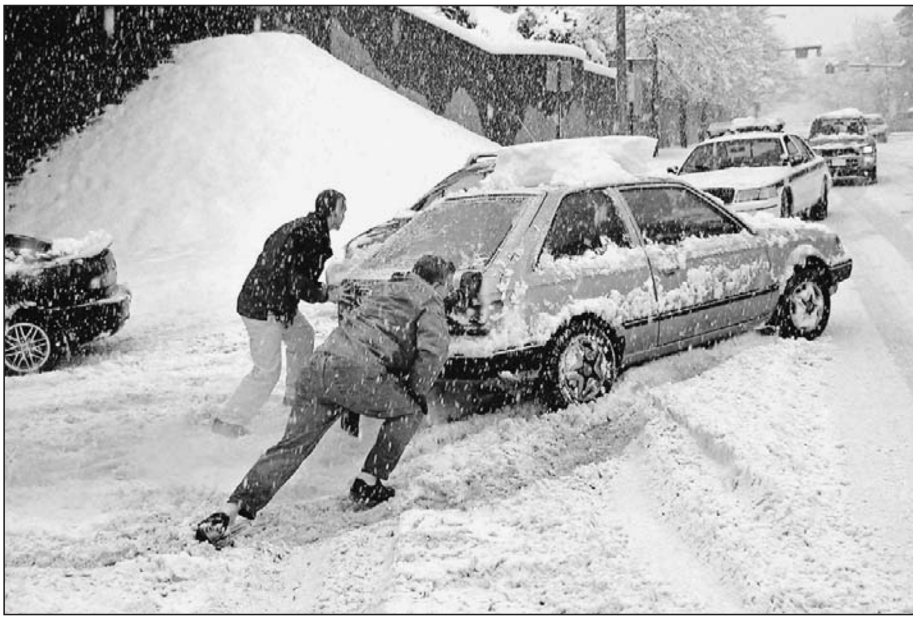
CAPÍTULO

4

FUERZA Y MOVIMIENTO

HECHOS DE FÍSICA

- Isaac Newton nació en la Navidad de 1642, el mismo día en que murió Galileo. (De acuerdo con el calendario gregoriano vigente en la actualidad, la fecha del nacimiento de Newton corresponde al 4 de enero de 1643. Inglaterra no utilizó el calendario gregoriano sino hasta 1752.)
- Newton
  - descubrió que la luz blanca es una mezcla de colores y teorizó que la luz está constituida por partículas —a las que llamó corpúsculos— y no por ondas. En la actualidad se sabe que la luz tiene naturaleza dual, pues se comporta como una onda y está formada por partículas llamadas fotones.
  - desarrolló los fundamentos del cálculo. Por su parte, Gottfried Leibniz, un matemático alemán, desarrolló una versión similar del cálculo. Siempre hubo una amarga disputa entre Newton y Leibniz, sobre quién debería recibir el crédito por lograr la hazaña primero.
  - fabricó el primer telescopio de reflexión con una potencia de 40X.
- El astrónomo Edmond Halley se basó en el trabajo de Newton sobre la gravitación y las órbitas para predecir que un cometa que había observado en 1682 regresaría en 1758. El cometa regresó, tal como él predijo, y en su honor se le puso el nombre de Halley. Al contrario de la creencia generalizada, Halley no descubrió el cometa. Sus apariciones periódicas se habían registrado desde el año 263 a.C., cuando astrónomos chinos lo vieron por primera vez. Halley murió en 1742 y no pudo ver el retorno de su cometa.

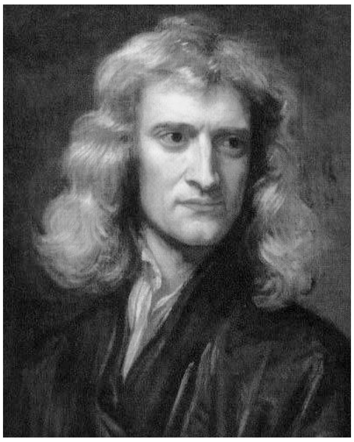


No es preciso estudiar física para saber qué se necesita para poner en movimiento el automóvil de la fotografía (o cualquier otra cosa): un empujón o un tirón. Si el desesperado automovilista (o la grúa a la que pronto llamará) puede aplicar suficiente *fuerza*, entonces este vehículo se moverá.

Sin embargo, ¿por qué el automóvil está atorado en la nieve? Su motor puede generar fuerza suficiente. ¿Por qué el conductor no pone simplemente el coche en reversa y sale de ahí? Para que un automóvil pueda moverse, se necesita otra fuerza, además de la que el motor ejerce: *fricción*. Aquí, el problema con toda seguridad es que no hay suficiente fricción entre los neumáticos y la nieve.

En los capítulos 2 y 3 aprendimos a analizar el movimiento en términos de cinemática. Ahora nuestra atención se centrará en el estudio de la *dinámica*; es decir, ¿qué causa el movimiento y los cambios de movimiento? Así llegaremos a los conceptos de fuerza e inercia.

Muchos de los primeros científicos se ocuparon del estudio de la fuerza y el movimiento. El científico inglés Isaac Newton (1642-1727 ▸figura 4.1) resumió las diversas relaciones y principios de esos estudiosos pioneros en tres afirmaciones, o leyes, que desde luego se conocen como *leyes de Newton del movimiento*. Estas leyes sintetizan los conceptos de la dinámica. En este capítulo conoceremos lo que Newton pensaba acerca de las fuerzas y el movimiento.



▲ **FIGURA 4.1** Isaac Newton
Newton (1642-1727), una de las más grandes mentes científicas de la historia, realizó aportaciones fundamentales a las matemáticas, la astronomía y varias ramas de la física, entre ellas la óptica y la mecánica. Formuló las leyes del movimiento y de la gravitación universal, y fue uno de los padres del cálculo. Realizó algunos de sus trabajos más trascendentes cuando tan sólo tenía veintitantos años.

Nota: en la notación $\sum \vec{\mathbf{F}}_i$, la letra griega sigma significa "sumatoria de" las fuerzas individuales (como se indica con el subíndice i): $\sum \vec{\mathbf{F}}_i = \vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2 + \vec{\mathbf{F}}_3 + \cdots$, es decir, una suma vectorial. Como se sobreentienden, a veces se omiten los subíndices i, y escribimos $\sum \vec{\mathbf{F}}$.

4.1 Los conceptos de fuerza y fuerza neta

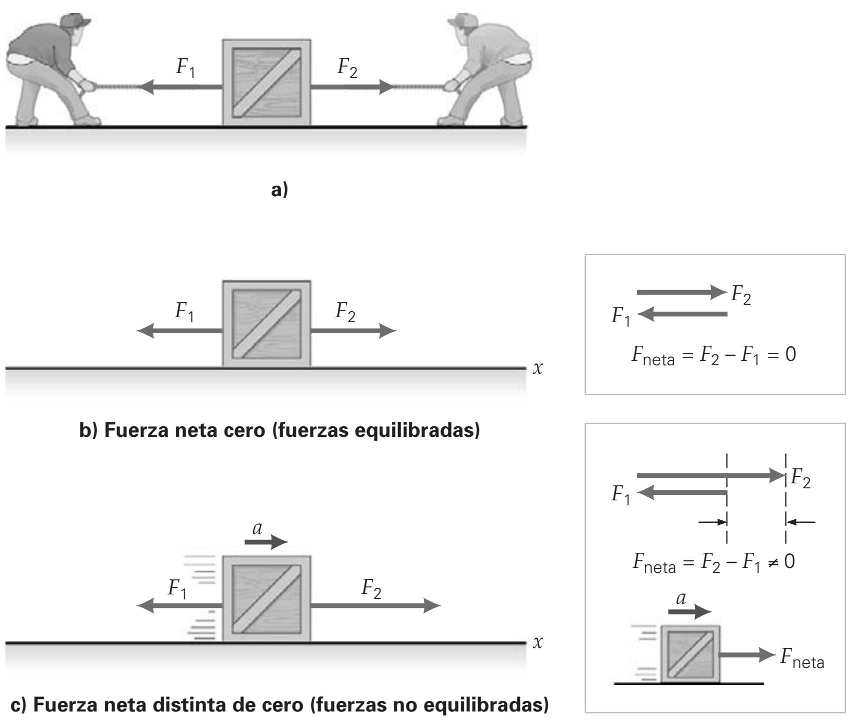
OBJETIVOS: *a*) Relacionar fuerza y movimiento, y *b*) explicar qué es una fuerza neta o no equilibrada.

Primero examinemos de cerca el concepto de fuerza. Resulta sencillo dar ejemplos de fuerzas, pero ¿cómo definiría en general este concepto? Una definición operativa de fuerza se basa en efectos observados. Esto es, describimos una fuerza en términos de lo que hace. Por experiencia propia, sabemos que *las fuerzas pueden producir cambios en el movimiento*. Una fuerza es capaz de poner en movimiento un objeto estacionario. También acelera o frena un objeto en movimiento, o cambia la dirección en que se mueve. En otras palabras, una fuerza puede producir un cambio de velocidad (rapidez o dirección, o ambas); es decir, una aceleración. Por lo tanto, un *cambio* observado en un movimiento, incluido un movimiento desde el reposo, es evidencia de una fuerza. Este concepto nos lleva a una definición común de **fuerza**:

> Una fuerza es algo que puede cambiar el estado de movimiento de un objeto (su velocidad).

La palabra "puede" es muy importante aquí, ya que toma en cuenta la posibilidad de que una fuerza esté actuando sobre un cuerpo; pero que su capacidad para producir un cambio de movimiento esté equilibrada, o se anule, gracias a una o más fuerzas. Entonces, el efecto neto sería cero. Así, una sola fuerza *no necesariamente* produce un cambio de movimiento. No obstante, se sigue que, si una fuerza actúa *sola*, el cuerpo sobre el que actúa *sí* experimentará una aceleración.

Puesto que una fuerza puede producir una aceleración —una cantidad vectorial— la fuerza en sí deberá ser una cantidad vectorial, tanto con magnitud como con dirección. Si varias fuerzas actúan sobre un objeto, lo que nos interesa en muchos casos es su efecto combinado: la fuerza neta. La fuerza neta, $\vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}}$, es la suma vectorial $\sum \vec{\mathbf{F}}_i$, o resultante, de todas las fuerzas que actúan sobre un objeto o sistema. (Véase la nota al margen.) Considere las fuerzas opuestas que se ilustran en la ▼figura 4.2a. La fuerza neta es cero cuando fuerzas de igual magnitud actúan en direcciones opuestas (figura 4.2b). Decimos que tales fuerzas están equilibradas. Una fuerza neta distinta de cero es una fuerza no equilibrada (figura 4.2c). En este caso, la situación puede analizarse como si sólo estuviera actuando una fuerza, igual a la fuerza neta. Una fuerza neta no equilibrada, es decir, distinta de cero, produce una aceleración. En algunos casos, la aplicación de una fuerza no equilibrada también podría deformar un objeto,



▶ **FIGURA 4.2** Fuerza neta
a) Se aplican fuerzas opuestas a una caja de embalaje. ***b)*** Si las fuerzas tienen la misma magnitud, la resultante vectorial, o fuerza neta que actúa sobre la caja, es cero. Decimos que las fuerzas que actúan sobre la caja están equilibradas. ***c)*** Si las fuerzas tienen diferente magnitud, la resultante no es cero. Entonces, sobre la caja actúa una fuerza neta (F_{neta}) distinta de cero (no equilibrada) y produce una aceleración (por ejemplo, una caja inicialmente en reposo se pone en movimiento).

es decir, modificar su forma o su tamaño, o ambos (como veremos en el capítulo 9). Una deformación implica un cambio de movimiento de una parte de un objeto; por lo tanto, hay una aceleración.

En ocasiones, las fuerzas se dividen en dos tipos o clases. La más conocida de estas clases es la de las *fuerzas de contacto*. Estas fuerzas surgen de un contacto físico entre objetos. Por ejemplo, cuando empujamos una puerta para abrirla o lanzamos o pateamos un balón, ejercemos una fuerza de contacto sobre la puerta o el balón.

La otra clase de fuerzas es la de las *fuerzas de acción a distancia*. Esto incluye la gravedad, la fuerza eléctrica entre dos cargas y la fuerza magnética entre dos imanes. La Luna es atraída hacia la Tierra por la gravedad, que la mantiene en órbita, aunque nada parece estar transmitiendo físicamente esa fuerza.

Ahora que entendemos mejor el concepto de fuerza, veamos cómo las leyes de Newton relacionan fuerza y movimiento.

Exploración 4.2 Cambio de dos fuerzas aplicadas

Exploración 4.3 Cambio de la fuerza aplicada para llegar a la meta

4.2 Inercia y la primera ley de Newton del movimiento

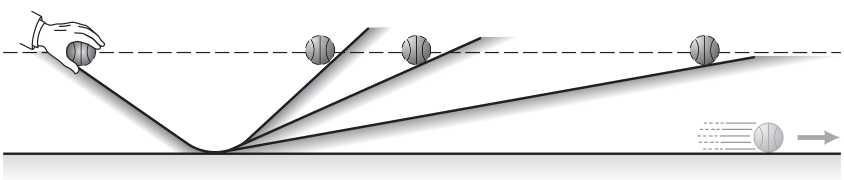
OBJETIVOS: *a*) Plantear y explicar la primera ley de Newton del movimiento, y *b*) describir la inercia y su relación con la masa.

Galileo sentó las bases de la primera ley de Newton del movimiento. En sus investigaciones experimentales, Galileo dejó caer objetos para observar el movimiento bajo la influencia de la gravedad. (Véase la sección A fondo al respecto del capítulo 2.) Sin embargo, la relativamente grande aceleración debida a la gravedad hace que los objetos que caen se muevan con gran rapidez y recorran una distancia considerable en un tiempo corto. Por las ecuaciones de cinemática del capítulo 2, vemos que, 3.0 s después de dejarse caer, un objeto en caída libre tiene una rapidez de unos 29 m/s (64 mi/h) y habrá caído una distancia de 44 m (o cerca de 48 yd, casi la mitad de la longitud de un campo de fútbol). Por ello, fue muy difícil efectuar mediciones experimentales de distancia en caída libre contra tiempo, con los instrumentos que había en la época de Galileo.

Para reducir las velocidades y poder estudiar el movimiento, Galileo usó esferas que ruedan por planos inclinados. Dejaba que una esfera descendiera rodando por un plano inclinado y luego subiera por otro con diferente grado de inclinación (▼figura 4.3). Observó que la esfera alcanzaba rodando aproximadamente la misma altura en todos los casos; pero rodaba más lejos en la dirección horizontal cuando el ángulo de la pendiente era menor. Si se le permitía rodar por una superficie horizontal, la esfera viajaba una distancia considerable, y más si la superficie se hacía más tersa. Galileo se preguntó qué tan lejos llegaría la esfera si fuera posible hacer perfectamente lisa (sin fricción) la superficie horizontal. Aunque era imposible lograrlo experimentalmente, Galileo razonó que, en ese caso ideal con una superficie infinitamente larga, la esfera continuaría rodando indefinidamente con un movimiento rectilíneo uniforme, pues no habría nada (ninguna fuerza neta) que la hiciera cambiar su movimiento.

Ilustración 3.2 Movimiento en un plano inclinado

Según la teoría de Aristóteles del movimiento, que había sido aceptada durante unos 1500 años antes de la época de Galileo, el estado normal de todo cuerpo es el reposo (con la excepción de los cuerpos celestes, que se pensaba estaban naturalmente en movimiento). Aristóteles probablemente observó que los objetos que se mueven sobre una superficie tienden a bajar su velocidad y detenerse, así que su conclusión le pareció lógica. Galileo, en cambio, concluyó por los resultados de sus experimentos que los cuerpos en movimiento exhiben el comportamiento de mantener ese movimiento, y que si un cuerpo inicialmente está en reposo, se mantendrá en reposo a menos que algo haga que se mueva.



◀ **FIGURA 4.3 Experimento de Galileo** Una pelota rueda más lejos por la pendiente de subida a medida que disminuye el ángulo de inclinación. En una superficie horizontal lisa, la pelota rueda una mayor distancia antes de detenerse. ¿Qué tan lejos llegaría la pelota en una superficie ideal, perfectamente lisa? (En este caso la pelota se deslizaría debido a la ausencia de fricción.)

Galileo llamó inercia a esta tendencia de los objetos a mantener su estado inicial de movimiento. Es decir,

Inercia es la tendencia natural de un objeto a mantener un estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme (velocidad constante).

Por ejemplo, si usted alguna vez ha intentado detener un automóvil que rueda lentamente, empujándolo, ha sentido su resistencia a un cambio de movimiento, a detenerse. Los físicos describen la propiedad de inercia en términos del comportamiento observado. En la ◂figura 4.4 se ilustra un ejemplo comparativo de inercia. Si los dos sacos de arena tienen la misma densidad (masa por unidad de volumen; véase el capítulo 1), el mayor tendrá más masa y por lo tanto más inercia, lo cual notaremos de inmediato si tratamos de golpear ambos sacos.

Nota: la inercia *no* es una fuerza.

Newton relacionó el concepto de inercia con la masa. Originalmente, señaló que la masa era una cantidad de materia, pero luego la redefinió de la siguiente manera:

La masa es una medida cuantitativa de la inercia.

Es decir, un objeto masivo tiene más inercia, o más resistencia a un cambio de movimiento, que uno menos masivo. Por ejemplo, un automóvil tiene más inercia que una bicicleta.

Primera ley de Newton: la ley de inercia

La **primera ley de Newton del movimiento**, también conocida como *ley de inercia*, resume tales observaciones:

En ausencia de la aplicación una fuerza no equilibrada ($\vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}} = 0$), un cuerpo en reposo permanece en reposo, y un cuerpo en movimiento permanece en movimiento con velocidad constante (rapidez y dirección constantes).

Es decir, si la fuerza neta que actúa sobre un objeto es cero, su aceleración será cero. Se movería con velocidad constante, o estaría en reposo: en ambos casos $\Delta\vec{\mathbf{v}} = 0$ o $\vec{\mathbf{v}} =$ es constante.

▲ **FIGURA 4.4** Diferencia de inercia El saco de arena más grande tiene más masa y por lo tanto más inercia, o resistencia a un cambio de movimiento.

4.3 Segunda ley de Newton del movimiento

OBJETIVOS: *a*) Establecer y explicar la segunda ley de Newton del movimiento, *b*) aplicarla a situaciones físicas y *c*) distinguir entre peso y masa.

Un cambio de movimiento, o aceleración (es decir, un cambio de rapidez o de dirección, o de ambas cuestiones) es evidencia de una fuerza neta. Todos los experimentos indican que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta aplicada, y tiene la dirección de ésta; es decir,

$$\vec{\mathbf{a}} \propto \vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}}$$

donde los símbolos en negritas con flechas arriba indican cantidades vectoriales. Por ejemplo, suponga que usted golpea dos pelotas idénticas. Si golpea una segunda pelota idéntica dos veces más fuerte que la primera (es decir, si le aplica el doble de fuerza), debería esperar que la aceleración de la segunda pelota fuera dos veces mayor que la de la primera (pero también en la dirección de la fuerza).

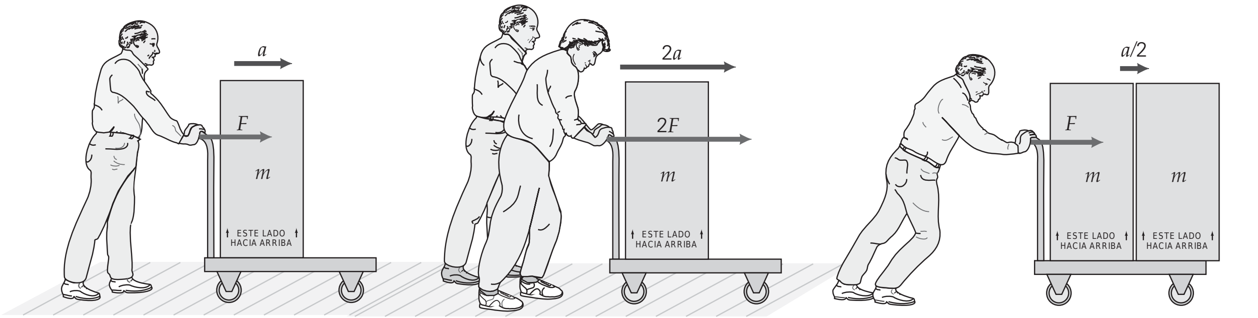
Sin embargo, como reconoció Newton, la inercia o masa del objeto también desempeña un papel. Para una fuerza neta dada, cuanto más masivo sea el objeto, menor será su aceleración. Por ejemplo, si usted golpea con la misma fuerza dos pelotas de diferente masa, la pelota menos masiva experimentaría una aceleración mayor. Es decir, la magnitud de la aceleración es inversamente proporcional a la de la masa.

De manera que tenemos:

$$\vec{\mathbf{a}} \propto \frac{\vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}}}{m}$$

es decir, con palabras,

La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa. La dirección de la aceleración es la de la fuerza neta aplicada.



a) Una fuerza neta distinta de cero acelera la caja: $a \propto F/m$

b) Si la fuerza neta se duplica, la aceleración se duplica

c) Si la masa se duplica, la aceleración se reduce a la mitad

▲ **FIGURA 4.5 Segunda ley de Newton** Las relaciones entre fuerza, aceleración y masa que se ilustran aquí se expresan con la segunda ley de Newton del movimiento (suponiendo que no hay fricción).

Ilustración 4.3 Segunda ley de Newton y fuerza

La ▲figura 4.5 presenta algunas ilustraciones de este principio.

Dado que $\vec{\mathbf{F}}_{\text{net}} \propto m\vec{\mathbf{a}}$, la **segunda ley de Newton del movimiento** suele expresarse en forma de ecuación como

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}} = m\vec{\mathbf{a}} \quad \textit{Segunda ley de Newton} \tag{4.1}$$

Unidad SI de fuerza: newton (N) o kilogramo-metro por segundo al cuadrado ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$)

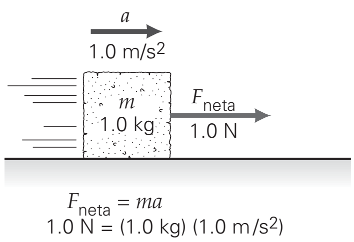
Segunda ley de Newton: fuerza y aceleración

donde $\vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}} = \sum \vec{\mathbf{F}}_i$. La ecuación 4.1 define la unidad SI de fuerza, que muy adecuadamente se denomina **newton (N)**.

La ecuación 4.1 también indica que (por análisis de unidades) un newton en unidades base se define como $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$. Es decir, una fuerza neta de 1 N da a una masa de 1 kg una aceleración de 1 m/s^2 (▸figura 4.6). La unidad de fuerza en el sistema inglés es la libra (lb). Una libra equivale aproximadamente a 4.5 N (en realidad, 4.448 N). Una manzana común pesa cerca de 1 N.

La segunda ley de Newton, $\vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}} = m\vec{\mathbf{a}}$, permite el análisis cuantitativo de la fuerza y el movimiento, que consideraríamos como una relación de causa y efecto, donde la fuerza es la causa y la aceleración es el efecto (movimiento).

Observe que si la fuerza neta que actúa sobre un objeto es cero, la aceleración del objeto será cero, y permanecerá en reposo o en movimiento uniforme, lo cual es coherente con la primera ley. En el caso de una fuerza neta distinta de cero (no equilibrada), la aceleración resultante tiene la misma dirección que la fuerza neta.*



▲ **FIGURA 4.6 El newton (N)** Una fuerza neta de 1.0 N que actúa sobre una masa de 1.0 kg produce una aceleración de 1.0 m/s^2 (sobre una superficie sin fricción).

Peso

Podemos usar la ecuación 4.1 para relacionar la masa con el peso. En el capítulo 1 vimos que el peso es la fuerza de atracción gravitacional que un cuerpo celeste ejerce sobre un objeto. Para nosotros, esa fuerza es la atracción gravitacional de la Tierra. Es fácil demostrar sus efectos: si dejamos caer un objeto, caerá (acelerará) hacia la Tierra. Puesto que sólo una fuerza actúa sobre el objeto, su **peso** ($\vec{\mathbf{w}}$) es la fuerza neta $\vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}}$, y podemos sustituir la aceleración debida a la gravedad ($\vec{\mathbf{g}}$) por $\vec{\mathbf{a}}$ en la ecuación 4.1. Por lo tanto, en términos de magnitudes, escribimos,

$$w = mg \tag{4.2}$$
$$(F_{\text{neta}} = ma)$$

De manera que la magnitud del peso de un objeto con 1.0 kg de masa es $w = mg = (1.0 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 9.8 \text{ N}$.

Así pues, 1.0 kg de masa tiene un peso de aproximadamente 9.8 N, o 2.2 lb, cerca de la superficie de la Tierra. Sin embargo, aunque la relación entre peso y masa dada

*Parecería que la primera ley de Newton es un caso especial de su segunda ley, pero no es así. La primera ley define lo que se conoce como un sistema inercial de referencia: un sistema donde no hay una fuerza neta, que no está acelerando o en el cual un objeto aislado está estacionario o se mueve con velocidad constante. Si se cumple la primera ley de Newton, entonces la segunda ley, en la forma $\mathbf{F}_{\text{neta}} = m\mathbf{a}$, es válida para dicho sistema.

Ilustración 4.1 Primera ley de Newton y marcos de referencia

por la ecuación 4.2 es sencilla, hay que tener presente que *la masa es la propiedad fundamental*. La masa no depende del valor de g; el peso sí. Como ya señalamos, la aceleración debida a la gravedad en la Luna es aproximadamente la sexta parte que en la Tierra, por lo que el peso de un objeto en la Luna sería la sexta parte de su peso en la Tierra; pero su masa, que refleja la cantidad de materia que contiene y su inercia, serían las mismas en ambos lugares.

La segunda ley de Newton (junto con el hecho de que $w \propto m$) explica por qué todos los objetos en caída libre tienen la misma aceleración. Considere, por ejemplo, dos objetos que caen; uno de los cuales tiene el doble de masa que el otro. El cuerpo con el doble de masa tiene el doble de peso, es decir, que sobre él actúa una fuerza gravitacional del doble. Sin embargo, el cuerpo más masivo también tiene el doble de inercia, así que se necesitaría el doble de fuerza para imprimirle la misma aceleración. Si expresamos matemáticamente esta relación, escribimos, para la masa menor (m), $F_{\text{neta}}/m = mg/m = g$, y para la masa mayor ($2m$), tenemos la misma aceleración: $a = F_{\text{neta}}/m = 2mg/2m = g$ (▸figura 4.7). En la sección A fondo 4.1 se describen otros efectos de g que quizás usted haya experimentado.

A FONDO 4.1 GRAVEDADES (g) DE FUERZA Y EFECTOS SOBRE EL CUERPO HUMANO

El valor de g en la superficie de la Tierra se denomina *aceleración estándar*, y a veces se usa como unidad no estándar. Por ejemplo, cuando despega una nave espacial, se dice que los astronautas experimentan una aceleración de “varias gravedades”. Esta expresión significa que la aceleración de los astronautas es varias veces la aceleración estándar g. Puesto que $g = w/m$, también pensamos en g como la *fuerza* (el peso) *por unidad de masa*. Por ello, a veces se usa el término **gravedades de fuerza** para denotar fuerzas correspondientes a múltiplos de la aceleración estándar.

Para entender mejor esta unidad no estándar de fuerza, veamos algunos ejemplos. Durante el despegue de un avión comercial, los pasajeros experimentan una fuerza horizontal media de aproximadamente $0.20g$. Esto implica que, conforme el avión acelera sobre la pista, el respaldo del asiento ejerce sobre el pasajero una fuerza horizontal igual a la quinta parte del peso del pasajero (para acelerarlo junto con el avión), pero el pasajero siente que lo empujan hacia atrás contra el asiento. Al despegar con un ángulo de 30°, la fuerza se incrementa a cerca de $0.70g$.

Cuando alguien se somete a varias gravedades verticalmente, la sangre puede comenzar a acumularse en las extremidades inferiores, lo cual podría hacer que los vasos sanguíneos se distiendan o que los capilares se revienten. En tales condiciones, el corazón tiene problemas para bombear la sangre por todo el cuerpo. Con una fuerza de aproximadamente $4g$, la acumulación de sangre en la parte inferior del cuerpo priva de suficiente oxígeno a la cabeza. La falta de circulación sanguínea hacia los ojos llega a causar una ceguera temporal, y si falta oxígeno en el cerebro, el individuo se siente desorientado y finalmente pierde el conocimiento. Una persona común sólo puede resistir varias gravedades durante un periodo corto.

La fuerza máxima sobre los astronautas en un trasbordador espacial durante el despegue es de aproximadamente $3g$; sin embargo, los pilotos de aviones de combate se someten a aceleraciones de hasta $9g$ cuando salen de un vuelo en picada. Estos individuos usan “trajes g”, que están especialmente diseñados para evitar el estancamiento de la sangre. La mayoría de estos trajes se inflan con aire comprimido y presionan las extremidades inferiores del piloto para evitar que la sangre se acumule ahí. Se está desarrollando un traje g hidrostático que contiene líquido, por lo que restringe mucho menos los movimientos que el aire. Cuando aumentan las gravedades, el líquido, al igual que la sangre del cuerpo, fluye hacia la parte inferior del traje y aplica presión a las piernas.

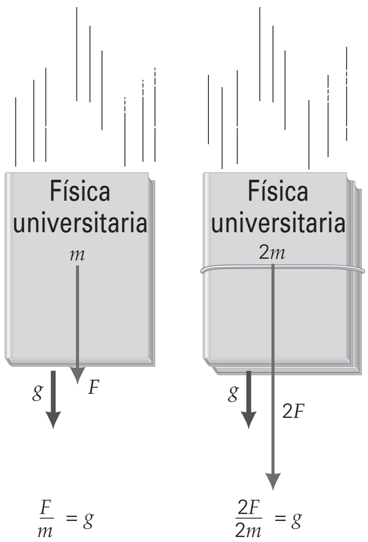
En la Tierra, donde sólo hay $1g$, se está usando una especie de “traje g” parcial, con la finalidad de prevenir coágulos en pacientes que se han sometido a cirugía de reemplazo de cadera. Se calcula que cada año entre 400 y 800 personas mueren durante los tres primeros meses después de tal cirugía, a causa sobre todo de los coágulos de sangre que se forman en una pierna, y se desprenden, pasan al torrente sanguíneo y finalmente se alojan en los pulmones, donde originan una condición llamada *embolia pulmonar*. En otros casos, un coágulo en la pierna podría detener el flujo de sangre hacia el corazón. Tales complicaciones surgen después de una cirugía de reemplazo de cadera, con mucha mayor frecuencia que después de casi cualquier otra cirugía, y lo hacen después de que el paciente ha sido dado de alta del hospital.

Los estudios han demostrado que la compresión neumática (operada por aire) de las piernas durante la hospitalización reduce tales riesgos. Un manguito de plástico en la pierna, que llega hasta el muslo, se infla a intervalos de unos cuantos minutos y empuja la sangre del tobillo hacia el muslo (figura 1). Este masaje mecánico evita que la sangre se estanque en las venas y se coagule. Con la ayuda de esta técnica y de terapia anticoagulante con fármacos, se espera prevenir muchas de las muertes postoperatorias.

FIGURA 1 Masaje neumático El dispositivo en las piernas se infla periódicamente, empujando la sangre desde los tobillos y previniendo que la sangre se acumule en las arterias.

La segunda ley de Newton nos permite analizar situaciones dinámicas. Al usar esta ley, deberíamos tener presente que F_{neta} es la *magnitud de la fuerza neta* y que m es la *masa total del sistema*. Las fronteras que definen un sistema pueden ser reales o imaginarias. Por ejemplo, un sistema podría consistir en todas las moléculas de gas que están en cierto recipiente sellado. Sin embargo, también podríamos definir un sistema como todas las moléculas de gas que hay en un metro cúbico arbitrario de aire. Al estudiar dinámica, es común trabajar con sistemas compuestos por una o más masas discretas; la Tierra y la Luna, por ejemplo, o una serie de bloques sobre una mesa, o un tractor y un remolque, como en el ejemplo 4.1.

Nota: en $F_{\text{neta}} = ma$, m es la masa total del sistema.



▲ **FIGURA 4.7 Segunda ley de Newton y caída libre** En caída libre, todos los objetos caen con la misma aceleración constante g. Si un objeto tiene el doble de masa que otro, sobre él actúa el doble de fuerza gravitacional. Sin embargo, al tener el doble de masa, el objeto también tiene el doble de inercia, de manera que se requiere dos veces más fuerza para darle la misma aceleración.

Ejemplo 4.1 ■ Segunda ley de Newton: cálculo de la aceleración

Un tractor tira de un remolque cargado sobre un camino plano, con una fuerza horizontal constante de 440 N (▼figura 4.8). Si la masa total del remolque y su contenido es de 275 kg, ¿qué aceleración tiene el remolque? (Desprecie todas las fuerzas de fricción.)

Razonamiento. Este problema es una aplicación directa de la segunda ley de Newton. Se da la masa total; tratamos las dos masas individuales (el remolque y su contenido) como una, y consideramos todo el sistema.

Solución. Tenemos estos datos:

Dado: $F = 440$ N, $m = 275$ kg ***Encuentre:*** a (aceleración)

En este caso, F es la fuerza neta, y la aceleración está dada por la ecuación 4.1, $F_{\text{neta}} = ma$. Despejando la magnitud de a,

$$a = \frac{F_{\text{neta}}}{m} = \frac{440\text{ N}}{275\text{ kg}} = 1.60\text{ m/s}^2$$

y la dirección de a es la dirección de la tracción.

Observe que m es la masa *total* del remolque y su contenido. Si nos hubieran dado por separado las masas del remolque y su contenido —digamos, $m_1 = 75$ kg y $m_2 = 200$ kg, respectivamente— se habrían sumado en la ley de Newton: $F_{\text{neta}} = (m_1 + m_2)a$. También, en el mundo real habría una fuerza de fricción opuesta. Suponga que hay una fuerza de fricción eficaz de $f = 140$ N. En este caso, la fuerza neta sería la suma vectorial de la fuerza ejercida por el tractor y la fuerza de fricción, de manera que la aceleración sería (empleando signos para los sentidos)

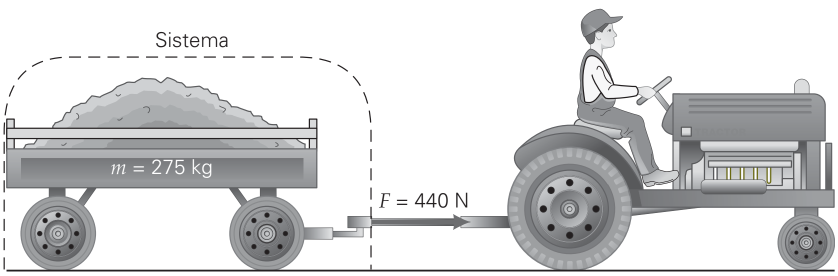
$$a = \frac{F_{\text{neta}}}{m} = \frac{F - f}{m_1 + m_2} = \frac{440\text{ N} - 140\text{ N}}{275\text{ kg}} = 1.09\text{ m/s}^2$$

Una vez más, el sentido de a sería el sentido de la tracción.

Con una fuerza neta constante, la aceleración también es constante, así que podemos aplicar las ecuaciones de cinemática del capítulo 2. Suponga que el remolque partió del reposo ($v_o = 0$). ¿Qué distancia recorrió en 4.00 s? Utilizando la ecuación adecuada de cinemática (ecuación 2.11, con $x_o = 0$) para el caso con fricción, tenemos

$$x = v_o t + \tfrac{1}{2}at^2 = 0 + \tfrac{1}{2}(1.09\text{ m/s}^2)(4.00\text{ s})^2 = 8.72\text{ m}$$

Ejercicio de refuerzo. Suponga que la fuerza aplicada al remolque es de 550 N. Con la misma fuerza de fricción, ¿qué velocidad tendría el remolque 4.0 s después de partir del reposo? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)



◀ **FIGURA 4.8 Fuerza y aceleración** Véase el ejemplo 4.1.

Ejemplo 4.2 ■ Segunda ley de Newton: cálculo de la masa

Una estudiante pesa 588 N. ¿Qué masa tiene?

Razonamiento. La segunda ley de Newton nos permite determinar la masa de un objeto si conocemos su peso (fuerza), pues se conoce g.

Solución.

Dado: $w = 588$ N ***Encuentre:*** m (masa)

Recuerde que el peso es una fuerza (gravitacional) y que se relaciona con la masa de un objeto en la forma $w = mg$ (ecuación 4.2), donde g es la aceleración debida a la gravedad (9.80 m/s^2). Después de reacomodar la ecuación, tenemos

$$m = \frac{w}{g} = \frac{588\ \text{N}}{9.80\ \text{m/s}^2} = 60.0\ \text{kg}$$

En los países que usan el sistema métrico, se usa la unidad de masa, el kilogramo, en vez de una unidad de fuerza, para expresar "peso". Se diría que esta estudiante pesa 60.0 "kilos".

Recuerde que 1 kg de masa tiene un peso de 2.2 lb en la superficie de la Tierra. Entonces, en unidades inglesas, ella pesaría 60.0 kg (2.2 lb/kg) = 132 lb.

Ejercicio de reforzamiento. *a*) Una persona en Europa está un poco pasada de peso y querría perder 5.0 "kilos". Calcule la pérdida equivalente en libras. *b*) ¿Qué "peso" tiene el lector en kilos?

Como hemos visto, un sistema dinámico puede constar de más de un objeto. En las aplicaciones de la segunda ley de Newton, suele ser provechoso, y a veces necesario, aislar un objeto dado dentro de un sistema. Dicho aislamiento es posible porque *la segunda ley de Newton también describe el movimiento de cualquier parte del sistema*, como demuestra el ejemplo 4.3.

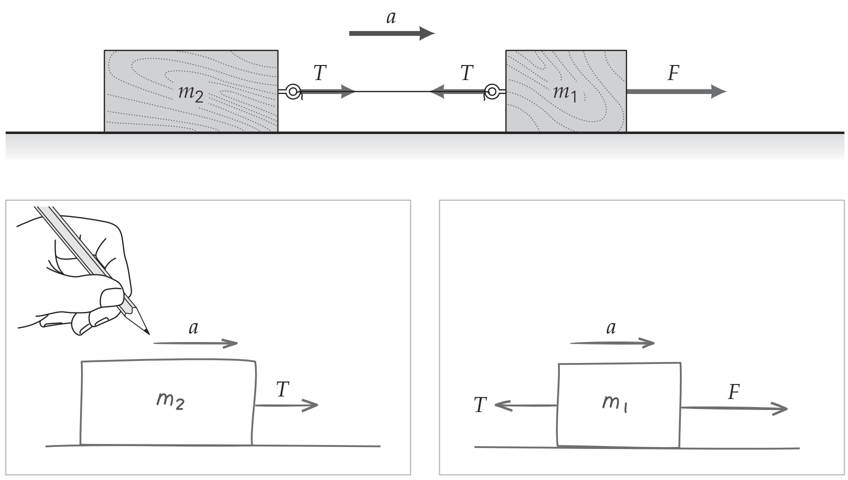
Ejemplo 4.3 ■ Segunda ley de Newton: ¿todo el sistema o una parte?

PHYSLET®
Ilustración 4.5 Jala tus remolques

Dos bloques con masas $m_1 = 2.5$ kg y $m_2 = 3.5$ kg descansan en una superficie sin fricción y están conectados con un cordel ligero (▼figura 4.9).* Se aplica una fuerza horizontal (F) de 12.0 N a m_1, como se indica en la figura. *a*) ¿Qué magnitud tiene la aceleración de las masas (es decir, del sistema total)? *b*) ¿Qué magnitud tiene la fuerza (T) en el hilo? [Cuando una cuerda o cordel se tensa, decimos que está sometido a tensión. En el caso de un cordel muy ligero, la fuerza en el extremo derecho tiene la misma magnitud (T) que en el izquierdo.]

Razonamiento. Es importante recordar que la segunda ley de Newton puede aplicarse a un sistema total o a cualquiera de sus partes (a un subsisistema, por decirlo así). Esto permite analizar componentes individuales de un sistema, si se desea. Es crucial identificar

▼ **FIGURA 4.9 Un sistema acelerado** Véase el ejemplo 4.3.



Separando las masas

* Cuando un objeto se describe como "ligero", se puede despreciar su masa al analizar la situación del problema. Es decir, su masa es insignificante en comparación con las demás masas.

las fuerzas que actúan, como ilustra este ejemplo. Luego aplicamos $F_{\text{neta}} = ma$ a cada subsistema o componente.

Solución. Cuidadosamente listamos los datos y lo que queremos calcular:

Dado: $m_1 = 2.5$ kg
$m_2 = 3.5$ kg
$F = 12.0$ N

Encuentre: *a*) a (aceleración)
b) T (tensión, una fuerza)

Dada una fuerza aplicada, la aceleración de las masas se puede calcular con base en la segunda ley de Newton. Al aplicar esa ley, es importante tener presente que es válida para el sistema total o *para cualquiera de sus partes*; es decir, para la masa total $(m_1 + m_2)$, a m_1 individualmente o a m_2 individualmente. Sin embargo, *debemos asegurarnos de identificar correctamente la fuerza o fuerzas apropiadas en cada caso*. La fuerza neta que actúa sobre las masas combinadas, por ejemplo, no es la misma que la fuerza neta que actúa sobre m_2 cuando se le considera por separado, como veremos.

***a*)** Primero, tomando el sistema total (es decir, considerando tanto m_1 como m_2), vemos que la fuerza neta que actúa sobre este sistema es F. Cabe señalar que, al considerar el sistema total, nos interesa sólo la fuerza externa neta que actúa sobre él. Las fuerzas *internas* T, iguales y opuestas, nada tienen que ver en este caso, pues se anulan. Representaremos la masa total como M, y escribiremos:

$$a = \frac{F_{\text{neta}}}{M} = \frac{F}{m_1 + m_2} = \frac{12.0\text{ N}}{2.5\text{ kg} + 3.5\text{ kg}} = 2.0\text{ m/s}^2$$

La aceleración es en la dirección de la fuerza aplicada, como indica la figura.

***b*)** Los cordeles (o hilos o alambres) flexibles sometidos a tensión ejercen una fuerza sobre un objeto, la cual está dirigida a lo largo del hilo. En la figura estamos suponiendo que la tensión se transmite *íntegramente* mediante el cordel; es decir, la tensión es la misma en todos los puntos del cordel. Así, la magnitud de T que actúa sobre m_2 es la misma que la que actúa sobre m_1. En realidad, esto es cierto sólo si el cordel tiene masa cero. En este libro únicamente consideraremos este tipo de cordeles o hilos *ligeros* (es decir, de masa insignificante) idealizados.

Entonces, una fuerza de magnitud T actúa sobre cada una de las masas, debido a la tensión en el cordel que las une. Para obtener el valor de T, es necesario considerar una *parte* del sistema que esté afectada por tal fuerza.

Podemos considerar cada bloque como un sistema aparte, en el cual sea válida la segunda ley de Newton. En estos subsistemas, la tensión entra en juego explícitamente. En el diagrama de la masa m_2 aislada de la figura 4.9, vemos que la única fuerza que actúa para acelerar esta masa es T. Conocemos los valores de m_2 y a, así que la magnitud de esta fuerza está dada directamente por

$$F_{\text{neta}} = T = m_2 a = (3.5\text{ kg})(2.0\text{ m/s}^2) = 7.0\text{ N}$$

En la figura 4.9 también se muestra un diagrama aparte de m_1 y también aplicamos la segunda ley de Newton a este bloque para calcular T. Debemos sumar vectorialmente las fuerzas para obtener la fuerza neta sobre m_1 que produce su aceleración. Recordamos que los vectores en una dimensión se pueden escribir con signos de dirección y magnitudes, así que

$$F_{\text{neta}} = F - T = m_1 a \quad \textit{(tomamos la dirección de F como positiva)}$$

Luego despejamos la magnitud de T,

$$\begin{aligned} T &= F - m_1 a \\ &= 12.0\text{ N} - (2.5\text{ kg})(2.0\text{ m/s}^2) = 12.0\text{ N} - 5.0\text{ N} = 7.0\text{ N} \end{aligned}$$

Ejercicio de refuerzo. Suponga que se aplica a m_2 de la figura 4.9 una segunda fuerza horizontal de 3.0 N hacia la izquierda. ¿Qué tensión habría en el cordel en este caso?

La segunda ley en forma de componentes

La segunda ley de Newton no sólo se cumple para cualquier parte de un sistema, sino que también es válida para cada uno de los componentes de la aceleración. Por ejemplo, expresamos una fuerza en dos dimensiones en notación de componentes como sigue:

$$\sum \vec{\mathbf{F}}_i = m\vec{\mathbf{a}}$$

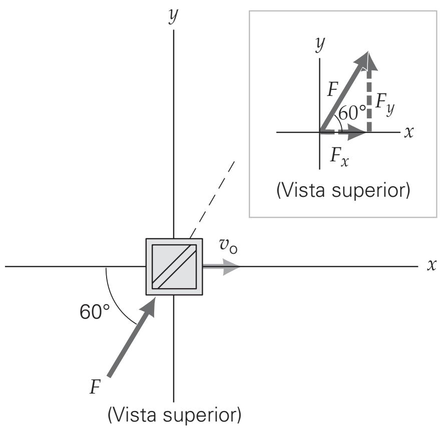
y

$$\sum (F_x\hat{\mathbf{x}} + F_y\hat{\mathbf{y}}) = m(a_x\hat{\mathbf{x}} + a_y\hat{\mathbf{y}}) = ma_x\hat{\mathbf{x}} + ma_y\hat{\mathbf{y}} \tag{4.3a}$$

Por lo tanto, para satisfacer tanto a x como a y de manera independiente, tenemos

$$\sum F_x = ma_x \quad \text{y} \quad \sum F_y = ma_y \tag{4.3b}$$

y la segunda ley de Newton es válida para cada componente por separado del movimiento. Cabe señalar que *ambas* ecuaciones deben cumplirse. (Asimismo, $\sum F_z = ma_z$ en tres dimensiones.) El ejemplo 4.4 ilustra la aplicación de la segunda ley empleando componentes.



▲ **FIGURA 4.10** Desviado
Se aplica una fuerza a un bloque en movimiento cuando llega al origen, y el bloque se desvía de su trayectoria rectilínea. Véase el ejemplo 4.4.

PHYSLET®
Exploración 4.4 Determine la fuerza de un disco (*puck*) de jockey

PHYSLET®
Exploración 4.5 Sonda espacial con diversos motores

PHYSLET®
Exploración 4.6 Golpear una pelota de golf hacia el hoyo

Ejemplo 4.4 ■ Segunda ley de Newton: componentes de fuerza

Un bloque con masa de 0.50 kg viaja con una rapidez de 2.0 m/s en la dirección x positiva sobre una superficie plana sin fricción. Al pasar por el origen, el bloque experimenta durante 1.5 s una fuerza constante de 3.0 N que forma un ángulo de 60° con respecto al eje x (◂figura 4.10). ¿Qué velocidad tiene el bloque al término de ese lapso?

Razonamiento. El hecho de que la fuerza no sea en la dirección del movimiento inicial nos haría pensar que la solución es complicada. Sin embargo, en el recuadro de la figura 4.10 vemos que la fuerza se puede descomponer en componentes. Entonces, podremos analizar el movimiento en la dirección de cada componente.

Solución. Primero, escribimos los datos y lo que se pide:

Dado: $m = 0.50$ kg
$v_{x_o} = 2.0$ m/s
$v_{y_o} = 0$
$F = 3.0$ N, $\theta = 60°$
$t = 1.5$ s

Encuentre: $\vec{\mathbf{v}}$ (velocidad al término de 1.5 s)

Calculemos las magnitudes de las fuerzas en las direcciones de los componentes:

$$F_x = F\cos 60° = (3.0\ \text{N})(0.500) = 1.5\ \text{N}$$
$$F_y = F\,\text{sen}\,60° = (3.0\ \text{N})(0.866) = 2.6\ \text{N}$$

Luego, aplicamos la segunda ley de Newton a cada dirección para obtener los componentes de aceleración:

$$a_x = \frac{F_x}{m} = \frac{1.5\ \text{N}}{0.50\ \text{kg}} = 3.0\ \text{m/s}^2$$
$$a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{2.6\ \text{N}}{0.50\ \text{kg}} = 5.2\ \text{m/s}^2$$

Ahora, por la ecuación de cinemática que relaciona velocidad y aceleración (ecuación 2.8), los componentes de velocidad del bloque están dados por

$$v_x = v_{x_o} + a_x t = 2.0\ \text{m/s} + (3.0\ \text{m/s}^2)(1.5\ \text{s}) = 6.5\ \text{m/s}$$
$$v_y = v_{y_o} + a_y t = 0 + (5.2\ \text{m/s}^2)(1.5\ \text{s}) = 7.8\ \text{m/s}$$

Al término de los 1.5 s, la velocidad del bloque es

$$\vec{\mathbf{v}} = v_x\hat{\mathbf{x}} + v_y\hat{\mathbf{y}} = (6.5\ \text{m/s})\hat{\mathbf{x}} + (7.8\ \text{m/s})\hat{\mathbf{y}}$$

Ejercicio de refuerzo. *a*) ¿Qué dirección tiene la velocidad al término de los 1.5 s? *b*) Si la fuerza se aplicara con un ángulo de 30° (en vez de 60°) con respecto al eje x, ¿cómo cambiarían los resultados de este ejemplo?

4.4 Tercera ley de Newton del movimiento

OBJETIVOS: *a*) Plantear y explicar la tercera ley de Newton del movimiento, y *b*) identificar pares de fuerzas de acción-reacción.

Newton formuló una tercera ley cuya relevancia en la física es tan amplia como la de las dos primeras. Como introducción sencilla a la tercera ley, consideremos las fuerzas que intervienen en el caso de un cinturón de seguridad. Si vamos en un automóvil en movimiento y se aplican repentinamente los frenos, por la inercia seguimos moviéndonos hacia delante conforme el automóvil se detiene. (La fuerza de fricción entre el asiento y nuestros muslos no es suficiente para detenernos.) Al hacerlo, ejercemos fuerzas hacia delante sobre el cinturón de seguridad y la correa diagonal. Ambos ejercen las correspondientes fuerzas de reacción (hacia atrás) sobre nosotros y hacen que frenemos junto con el vehículo. Si no nos abrochamos el cinturón, seguiremos en movimiento (según la primera ley de Newton) hasta que otra fuerza, como la aplicada por el tablero o el parabrisas, nos detenga.

Comúnmente pensamos que las fuerzas se dan individualmente; sin embargo, Newton reconoció que es imposible tener una fuerza sola. Él observó que, en cualquier aplicación de fuerza, siempre hay una interacción mutua, y que las fuerzas siempre se dan en pares. Un ejemplo dado por Newton fue que, si ejercemos presión sobre una piedra con el dedo, el dedo también es presionado por la piedra (o recibe una fuerza de ésta).

Newton llamó a las fuerzas apareadas *acción* y *reacción*, y la **tercera ley de Newton del movimiento** es:

Tercera ley de Newton: acción y reacción

Para cada fuerza (acción), hay una fuerza igual y opuesta (reacción).

En notación simbólica, la tercera ley de Newton es

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

Es decir, $\vec{\mathbf{F}}_{12}$ es la fuerza ejercida *sobre* el objeto 1 *por* el objeto 2, y $-\vec{\mathbf{F}}_{21}$ es la fuerza igual y opuesta ejercida *sobre* el objeto 2 *por* el objeto 1. (El signo menos indica la dirección opuesta.) *La decisión de cuál fuerza es la acción y cuál la reacción es arbitraria*; $\vec{\mathbf{F}}_{21}$ podría ser la reacción a $\vec{\mathbf{F}}_{12}$ o viceversa.

A primera vista, parecería que la tercera ley de Newton contradice la segunda: si siempre hay fuerzas iguales y opuestas, ¿cómo puede haber una fuerza neta distinta de cero? Algo que debemos recordar acerca del par de fuerzas de la tercera ley es que *las fuerzas de acción-reacción no actúan sobre el mismo objeto*. La segunda ley se ocupa de fuerzas que actúan sobre un objeto (o sistema) específico. Las fuerzas opuestas de la tercera ley actúan sobre objetos *distintos*. Por lo tanto, las fuerzas no pueden anularse entre sí ni tener una suma vectorial de cero cuando aplicamos la segunda ley a objetos individuales.

Para ilustrar esta distinción, considere las situaciones que se muestran en la ▸figura 4.11. Es común olvidarnos de la fuerza de reacción. Por ejemplo, en la sección izquierda de la figura 4.11a, la fuerza evidente que actúa sobre un bloque que descansa sobre una mesa es la atracción gravitacional de la Tierra, que se expresa como el peso mg. Sin embargo, *debe haber otra fuerza* que actúe sobre el bloque. Para que el bloque no tenga aceleración, la mesa deberá ejercer una fuerza hacia arriba $\vec{\mathbf{N}}$ cuya magnitud es igual al peso del bloque. Así, $\sum F_y = +N - mg = ma_y = 0$, donde la dirección de los vectores se indica con signos más y menos.

Como reacción a $\vec{\mathbf{N}}$, el bloque ejerce sobre la mesa una fuerza hacia abajo, $-\vec{\mathbf{N}}$, cuya magnitud es la del peso del bloque, mg. Sin embargo, $-\vec{\mathbf{N}}$ *no* es el peso del objeto. El peso y $-\vec{\mathbf{N}}$ tienen diferente origen: el peso es la fuerza gravitacional de acción a distancia; mientras que $-\vec{\mathbf{N}}$ es una fuerza de contacto entre las dos superficies.

Es fácil demostrar la presencia de esta fuerza hacia arriba sobre el bloque tomando éste con la mano y sosteniéndolo; estaremos ejerciendo una fuerza hacia arriba sobre el bloque (y sentimos una fuerza de reacción $-\vec{\mathbf{N}}$ sobre la mano). Si aplicáramos una fuerza mayor, es decir, $N > mg$, el bloque aceleraría hacia arriba.

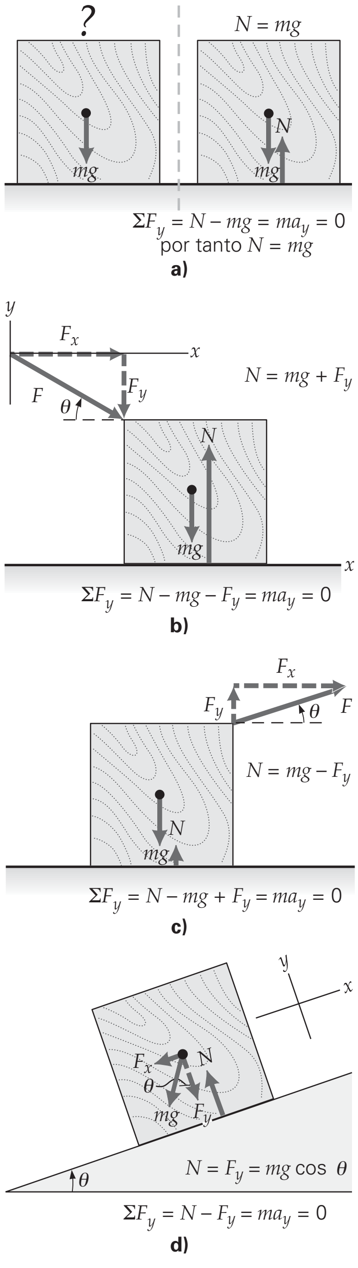
Llamamos fuerza normal a la fuerza que una superficie ejerce sobre un objeto, y la denotamos con el símbolo N. *Normal* significa *perpendicular*. La **fuerza normal** que una superficie ejerce sobre un objeto siempre es perpendicular a la superficie. En la figura 4.11a, la fuerza normal es igual y opuesta al peso del bloque. Sin embargo, la fuerza normal no siempre es igual y opuesta al peso de un objeto. La fuerza normal es una fuerza de "reacción", ya que reacciona a la situación. Como ejemplos tenemos las figuras 4.11a, b, c y d, que se describen como la sumatoria de los componentes verticales ($\sum F_y$).

En la figura 4.11b se aplica una fuerza angulada hacia abajo.

$$\sum F_y: \quad N - mg - F_y = ma_y = 0 \quad \text{y} \quad N = mg + F_y \qquad (N > mg)$$

En la figura 4.11c se aplica una fuerza angulada hacia arriba.

$$\sum F_y: \quad N - mg + F_y = ma_y = 0 \quad \text{y} \quad N = mg - F_y \qquad (N < mg)$$



▲ **FIGURA 4.11 Distinciones entre la segunda y la tercera leyes de Newton** La segunda ley de Newton se ocupa de las fuerzas que actúan sobre un objeto (o sistema) específico. En cambio, la tercera ley de Newton se ocupa del par de fuerzas que actúa sobre objetos distintos. (Véase el ejemplo conceptual 4.5.)

En la figura 4.11d hay un bloque sobre un plano inclinado. (La fuerza normal es perpendicular a la superficie del plano.)

$$\Sigma F_y: \quad N - F_y = ma_y = 0, \quad \text{y} \quad N = F_y = mg\cos\theta$$

En este caso el componente de peso, F_x, aceleraría el bloque abajo del plano en ausencia de una fuerza de fricción igual y opuesta entre el bloque y la superficie del plano.

Ilustración 4.6 Tercera ley de Newton, fuerzas de contacto

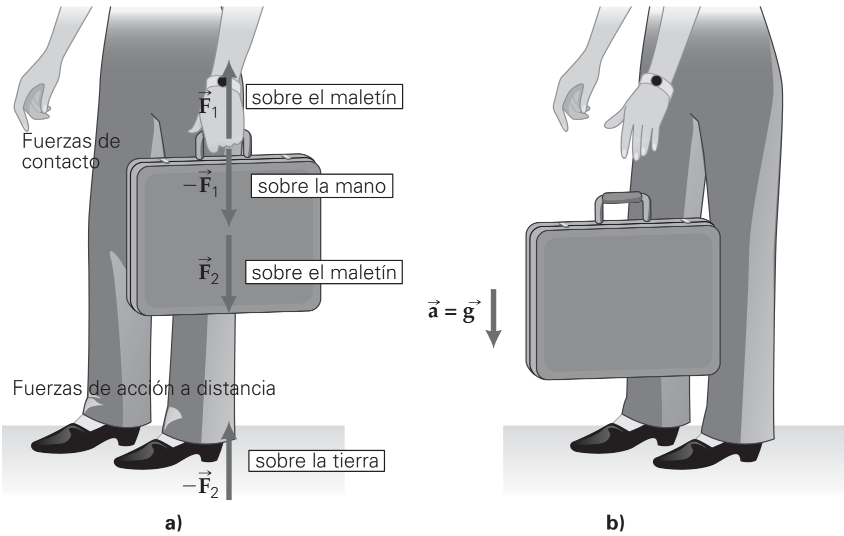
Ejemplo conceptual 4.5 ■ ¿Dónde están los pares de fuerza de la tercera ley de Newton?

Una mujer que espera cruzar la calle lleva un maletín en la mano, como se observa en la ▼figura 4.12a. Identifique todos los pares de fuerza según la tercera ley en relación con el maletín en esta situación.

Razonamiento y respuesta. Al estar sostenido sin ningún movimiento, la aceleración del maletín es cero, y $\Sigma F_y = 0$. Centrándonos sólo en el maletín, es posible identificar dos fuerzas iguales y opuestas que actúan sobre él: su peso hacia abajo y la fuerza hacia arriba aplicada por la mano. Sin embargo, estas dos fuerzas *no constituyen* un par de fuerza de la tercera ley, porque actúan sobre el *mismo* objeto.

En una inspección general, usted se dará cuenta de que la fuerza de reacción ante la fuerza hacia arriba de la mano sobre el maletín es una fuerza hacia abajo en la mano. Entonces, ¿qué sucede con la fuerza de reacción al peso del maletín? Puesto que el peso es la fuerza de atracción gravitacional sobre el maletín que ejerce la Tierra, la fuerza correspondiente sobre la Tierra que ejerce el maletín constituye el par de fuerza de la tercera ley.

Ejercicio de refuerzo. La mujer, sin darse cuenta, tira su maletín como se observa en la figura 4.12b. ¿Existe algún par de fuerza según la tercera ley en esta situación? Explique su respuesta.



▶ **FIGURA 4.12** Pares de fuerzas de la tercera ley de Newton
a) Cuando una persona sostiene un maletín, hay dos pares de fuerzas: un par de contacto ($\vec{F}_1$ y $-\vec{F}_1$) y un par de acción a distancia (gravedad) ($\vec{F}_2$ y $-\vec{F}_2$). La fuerza neta que actúa sobre el maletín es cero: la fuerza de contacto hacia arriba ($\vec{F}_1$) equilibra a la fuerza del peso hacia abajo. Sin embargo, observe que la fuerza de contacto hacia arriba y la fuerza del peso hacia abajo no son un par según la tercera ley. ***b)*** ¿Hay algún par de fuerzas de acuerdo con la tercera ley? Véase el Ejercicio de refuerzo del ejemplo.

La propulsión a chorro es otro ejemplo de la tercera ley de Newton en acción. En el caso de un cohete, éste y los gases de escape ejercen fuerzas iguales y opuestas entre sí. El resultado es que los gases de escape aceleran alejándose del cohete, y éste acelera en la dirección opuesta. Cuando "se lanza" un cohete grande, como durante el despegue de un trasbordador espacial, el cohete libera gases de escape encendidos. Un error muy común es creer que los gases de escape "empujan" contra la plataforma de lanzamiento para acelerar el cohete. Si esta interpretación fuera correcta, no habría viajes espaciales, pues en el espacio no hay nada contra qué "empujar". La explicación correcta implica acción (gases que ejercen una fuerza sobre el cohete) y reacción (cohete que ejerce una fuerza opuesta sobre los gases).

En la sección A fondo 4.2 se da otro ejemplo de par acción-reacción.

A FONDO 4.2 NAVEGANDO CONTRA EL VIENTO: VIRADA

Un velero puede navegar fácilmente en la dirección del viento (ya que este último es el que infla las velas). Sin embargo, después de navegar cierta distancia en la dirección del viento, el capitán por lo general desea regresar al puerto, lo que supone "navegar contra el viento". Esto parece imposible, pero no lo es. Se le llama *virada* y se explica por medio de vectores de fuerza y de las leyes de Newton.

Un velero no puede navegar directamente contra el viento, puesto que la fuerza de éste sobre el velero lo aceleraría hacia atrás, es decir, hacia el lado opuesto de la dirección deseada. El viento que infla la vela ejerce una fuerza F_s perpendicular a ésta (figura 1a). Si el velero se guía con un ángulo relativo a la dirección del viento, existirá un componente de fuerza paralelo a la cabeza del velero ($F_{\|}$). Con este curso se gana cierta distancia contra el viento, pero nunca se haría llegar al velero de regreso al puerto. El componente perpendicular ($F_{\perp}$) actuaría sobre los lados y pondría al velero fuera de curso.

Así, como un viejo lobo de mar, el capitán "vira" o maniobra el velero de manera que el componente paralelo de la fuerza cambie en 90° (figura 1b). El capitán repite continuamente esta maniobra y, utilizando el curso en zigzag, el velero regresa al puerto (figura 2a).

¿Qué sucede con el componente perpendicular de la fuerza? Tal vez usted piense que esto llevaría al velero fuera de curso. Y lo haría, de hecho lo hace un poco, pero la mayoría de la fuerza perpendicular está equilibrada por la quilla del velero, que es la parte inferior de éste (figura 2b). La resistencia del agua ejerce una fuerza opuesta sobre la quilla, que anula la mayor parte de la fuerza perpendicular de los lados, produciendo poca —si acaso alguna— aceleración en esa dirección.

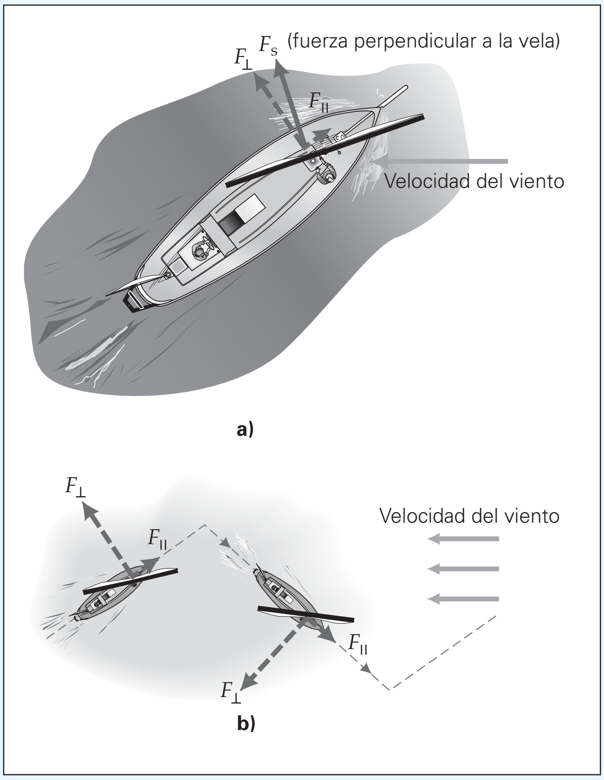


FIGURA 1 Vamos en virada ***a)*** El viento que infla la vela ejerce una fuerza perpendicular sobre ésta (F_s). Podemos descomponer este vector de fuerza en componentes. Una componente es paralela al movimiento del velero ($F_{\|}$). ***b)*** Al cambiar la dirección de la vela, el capitán puede "virar" el velero contra el viento.

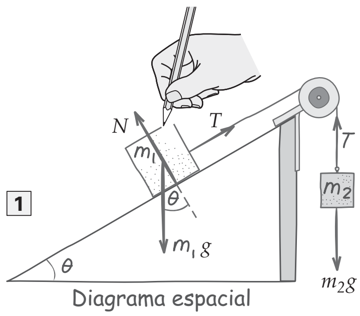
FIGURA 2 Contra el viento ***a)*** Conforme el capitán lleva el velero contra el viento, se inicia la virada. ***b)*** El componente perpendicular de la fuerza en la virada llevaría al velero fuera de curso por los lados. Pero la resistencia del agua sobre la quilla en la parte inferior del velero ejerce una fuerza opuesta y anula la mayor parte de la fuerza de los lados.

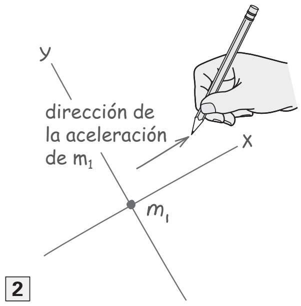
PHYSLET®

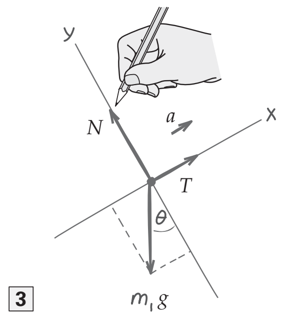
Ilustración 4.2 Diagramas de cuerpo libre

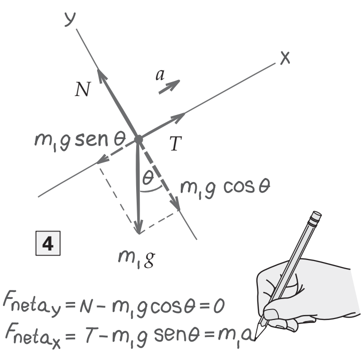
APRENDER DIBUJANDO

Fuerzas sobre un objeto en un plano inclinado y diagramas de cuerpo libre









4.5 Más acerca de las leyes de Newton: diagramas de cuerpo libre y equilibrio traslacional

OBJETIVOS: *a*) Aplicar las leyes de Newton al análisis de diversas situaciones usando diagramas de cuerpo libre, y *b*) entender el concepto de equilibrio traslacional.

Ahora que conocemos las leyes de Newton y algunas de sus aplicaciones en el análisis del movimiento, debería ser evidente la importancia de esas leyes. Su planteamiento es sencillo, pero sus repercusiones son inmensas. Tal vez la segunda ley sea la que más a menudo se aplica, en virtud de su relación matemática. No obstante, la primera y la tercera se utilizan mucho en análisis cualitativo, como veremos al continuar nuestro estudio de las distintas áreas de la física.

En general, nos ocuparemos de aplicaciones en las que intervienen fuerzas constantes, las cuales producen aceleraciones constantes y nos permiten usar las ecuaciones de cinemática del capítulo 2 para analizar el movimiento. Si la fuerza es variable, la segunda ley de Newton es válida para la fuerza y la aceleración *instantáneas*; sin embargo, la aceleración variará con el tiempo, y necesitaremos algo de cálculo para analizarla. En general, nos limitaremos a aceleraciones y a fuerzas constantes. En esta sección presentaremos varios ejemplos de aplicaciones de la segunda ley de Newton, de manera que el lector se familiarice con su uso. Esta pequeña pero potente ecuación se usará una y otra vez a lo largo de todo el libro.

En el acervo para resolver problemas hay otro recurso que es de gran ayuda en las aplicaciones de fuerza: los diagramas de cuerpo libre, los cuales se explican en la siguiente sección.

Estrategia para resolver problemas: diagramas de cuerpo libre

En las ilustraciones de situaciones físicas, también conocidas como *diagramas espaciales*, se pueden dibujar vectores de fuerza en diferentes lugares para indicar sus puntos de aplicación. Sin embargo, como de momento sólo nos ocupamos de movimientos rectilíneos, podemos mostrar los vectores en *diagramas de cuerpo libre* (DCL) como si emanaran de un punto en común, que se elige como origen de los ejes *x*-*y*. Por lo regular, se escoge uno de los ejes en la dirección de la fuerza neta que actúa sobre un cuerpo, porque ésa es la dirección en la que acelerará el cuerpo. Además, suele ser útil descomponer los vectores de fuerza en componentes, y una selección adecuada de ejes *x*-*y* hace más sencilla dicha tarea.

En un diagrama de cuerpo libre, las flechas de los vectores no tienen que dibujarse exactamente a escala; aunque debe ser evidente si existe una fuerza neta o no, y si las fuerzas se equilibran o no en una dirección específica. Si las fuerzas no se equilibran, por la segunda ley de Newton, sabremos que debe haber una aceleración.

En resumen, los pasos generales para construir y usar diagramas de cuerpo libre son (remítase a las ilustraciones al margen mientras lee):

1. Haga un dibujo, o diagrama espacial, de la situación (si no le dan uno) e identifique las fuerzas que actúan sobre cada cuerpo del sistema. Un diagrama espacial es una ilustración de la situación física que identifica los vectores de fuerza.
2. Aísle el cuerpo para el cual se va a construir el diagrama de cuerpo libre. Trace un conjunto de ejes cartesianos, con el origen en un punto a través del cual actúan las fuerzas y con uno de los ejes en la dirección de la aceleración del cuerpo. (La aceleración tendrá la dirección de la fuerza neta, si la hay.)
3. Dibuje los vectores de fuerza debidamente orientados (incluyendo los ángulos) en el diagrama, de manera que los ejes emanen del origen. Si hay una fuerza no equilibrada, suponga una dirección de aceleración e indíquela con un vector de aceleración. Tenga cuidado de incluir sólo las fuerzas que actúan sobre el cuerpo aislado de interés.
4. Descomponga en componentes *x* y *y* las fuerzas que no estén dirigidas en los ejes *x* o *y* (use signos más y menos para indicar dirección y el sentido). Utilice el diagrama de cuerpo libre para analizar las fuerzas en términos de la segunda ley de Newton del movimiento. (*Nota:* si supone que la aceleración es en cierta dirección, y en la solución tiene el signo opuesto, la aceleración tendrá realmente la dirección opuesta a la que se supuso. Por ejemplo, si supone, que $\vec{a}$ está en la dirección $+x$, pero obtiene una respuesta negativa, querrá decir que $\vec{a}$ está en la dirección $-x$.)

Los diagramas de cuerpo libre son muy útiles para seguir uno de los procedimientos sugeridos para resolver problemas del capítulo 1: hacer un diagrama para visualizar y analizar la situación física del problema. *Acostúmbrese a elaborar diagramas de cuerpo libre para los problemas de fuerza, como se hace en los siguientes ejemplos.*

Ilustración 4.4 Masa sobre un plano inclinado

Exploración 4.1 *Vectores para una caja sobre un plano inclinado*

Ejemplo 4.6 ■ ¿Sube o baja?: movimiento en un plano inclinado sin fricción

Dos masas están unidas por un cordel (o hilo) ligero que pasa por una polea ligera con fricción insignificante, como ilustran los diagramas de Aprender dibujando. Una masa ($m_1 = 5.0$ kg) está en un plano inclinado de 20° sin fricción y el otro ($m_2 = 1.5$ kg) cuelga libremente. Calcule la aceleración de las masas. (En el diagrama sólo se muestra el diagrama de cuerpo libre de m_1. El lector tendrá que dibujar el de m_2.)

Razonamiento. Aplicamos la estrategia anterior para resolver problemas.

Solución. Siguiendo nuestro procedimiento habitual, escribimos

Dado: $m_1 = 5.0$ kg
$m_2 = 1.5$ kg
$\theta = 20°$

Encuentre: $\vec{\mathbf{a}}$ (aceleración)

Para visualizar las fuerzas que intervienen, aislamos m_1 y m_2 y dibujamos diagramas de cuerpo libre para cada masa. En el caso de la masa m_1, hay tres fuerzas concurrentes (fuerzas que actúan a través de un punto en común): T, el peso m_1g y N, donde T es la fuerza de tensión del cordel sobre m_1 y N es la fuerza normal del plano sobre el bloque (DCL 3). Las fuerzas se dibujan emanando desde su punto de acción común. (Recordemos que los vectores pueden moverse en tanto no se alteren su magnitud ni su dirección.)

Comenzaremos por suponer que m_1 acelera plano arriba, en la dirección que tomamos como $+x$. (Da igual si suponemos que m_1 acelera plano arriba o plano abajo, como veremos en breve.) Observe que m_1g (el peso) se ha descompuesto en componentes. El componente x es opuesto a la dirección de aceleración supuesta; el componente y actúa perpendicularmente al plano y se equilibra con la fuerza normal N. (No hay aceleración en la dirección y, así que no hay fuerza neta en esa dirección.)

Entonces, aplicando la segunda ley de Newton en forma de componentes (ecuación 4.3b) a m_1, tenemos

$$\Sigma F_{x_1} = T - m_1 g \operatorname{sen}\theta = m_1 a$$

$$\Sigma F_{y_1} = N - m_1 g \cos\theta = m_1 a_y = 0 \quad (a_y = 0, \textit{ no hay fuerzas netas, las fuerzas se cancelan})$$

Y, para m_2

$$\Sigma F_{y_2} = m_2 g - T = m_2 a_y = m_2 a$$

donde se han despreciado las masas del cordel y la polea. Puesto que están conectadas por un cordel, las aceleraciones de m_1 y m_2 tienen la misma magnitud, y usamos $a_x = a_y = a$.

Si sumamos la primera y última ecuaciones para eliminar T, tenemos

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

(fuerza neta = masa *total* × aceleración)

(Note que ésta es la ecuación que se obtendría aplicando la segunda ley de Newton al sistema en su totalidad, ya que en el sistema que incluye los dos bloques, las fuerzas $+T$ son internas y se anulan.)

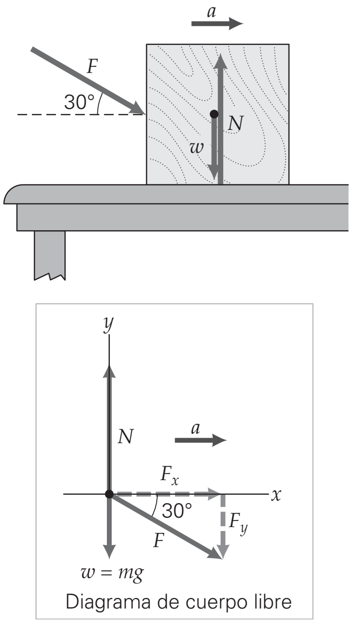
Ahora despejamos a:

$$\begin{aligned} a &= \frac{m_2 g - m_1 g \operatorname{sen} 20°}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{(1.5\text{ kg})(9.8\text{ m/s}^2) - (5.0\text{ kg})(9.8\text{ m/s}^2)(0.342)}{5.0\text{ kg} + 1.5\text{ kg}} \\ &= -0.32\text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

El signo menos indica que la aceleración es opuesta a la dirección supuesta. Es decir, m_1 en realidad acelera plano abajo, y m_2 acelera hacia arriba. Como demuestra este ejemplo, si suponemos la dirección equivocada para la aceleración, el signo del resultado nos dará la dirección correcta de cualquier forma.

¿Podríamos calcular la fuerza de tensión T en el cordel si nos la pidieran? La forma de hacerlo debería ser evidente si se examina el diagrama de cuerpo libre.

Ejercicio de refuerzo. *a*) En este ejemplo, ¿cuál sería la masa mínima de m_2 para que m_1 no acelere arriba ni abajo del plano? *b*) Con las mismas masas del ejemplo, ¿cómo tendría que ajustarse el ángulo de inclinación para que m_1, no acelere arriba ni abajo del plano?



▲ **FIGURA 4.13** **Cálculo de la fuerza de los efectos del movimiento**
Véase el ejemplo 4.7.

PHYSLET®
Exploración 4.7 Máquina de Atwood

Ejemplo 4.7 ■ Componentes de fuerza y diagramas de cuerpo libre

Una fuerza de 10.0 N se aplica con un ángulo de 30° respecto a la horizontal, a un bloque de 1.25 kg que descansa en una superficie sin fricción, como se ilustra en la ◂figura 4.13. *a*) ¿Qué magnitud tiene la aceleración que se imprime al bloque? *b*) ¿Qué magnitud tiene la fuerza normal?

Razonamiento. La fuerza aplicada puede descomponerse en componentes. El componente horizontal acelera el bloque. El componente vertical afecta la fuerza normal (véase la figura 4.11).

Solución. Primero anotamos los datos y lo que se pide:

Dado: $F = 10.0$ N, $m = 1.25$ kg, $\theta = 30°$, $v_o = 0$

Encuentre: *a*) a (aceleración); *b*) N (fuerza normal)

Ahora dibujamos un diagrama de cuerpo libre para el bloque, como en la figura 4.13.

***a*)** La aceleración del bloque puede calcularse aplicando la segunda ley de Newton. Elegimos los ejes de manera que a esté en la dirección $+x$. Como muestra el diagrama de cuerpo libre, sólo un componente (F_x) de la fuerza aplicada F actúa en esta dirección. El componente de F en la dirección del movimiento es $F_x = F\cos\theta$. Aplicamos la segunda ley de Newton en la dirección $+x$ para calcular la aceleración:

$$F_x = F\cos 30° = ma_x$$

$$a_x = \frac{F\cos 30°}{m} = \frac{(10.0\text{ N})(0.866)}{1.25\text{ kg}} = 6.93\text{ m/s}^2$$

***b*)** La aceleración obtenida en el inciso a es la aceleración del bloque, ya que éste sólo se mueve en la dirección x (no acelera en la dirección y). Con $a_y = 0$, la suma de fuerzas en la dirección y deberá ser cero. Es decir, el componente hacia abajo de F que actúa sobre el bloque, F_y, y la fuerza de su peso, w, se deberán equilibrar con la fuerza normal, N, que la superficie ejerce hacia arriba sobre el bloque. Si no sucediera así, habría una fuerza neta y una aceleración en la dirección y.

Sumamos las fuerzas en la dirección y, tomando hacia arriba como positivo

$$\Sigma F_y = N - F_y - w = 0$$

es decir

$$N - F\text{ sen }30° - mg = 0$$

y

$$N = F\text{ sen }30° + mg = (10.0\text{ N})(0.500) + (1.25\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2) = 17.3\text{ N}$$

Así pues, la superficie ejerce una fuerza de 17.3 N hacia arriba sobre el bloque, y equilibra la suma de las fuerzas hacia abajo que actúan sobre él.

Ejercicio de refuerzo. *a*) Suponga que la fuerza sólo se aplica al bloque durante un tiempo corto. ¿Qué magnitud tiene la fuerza normal después de que se deja de aplicar la fuerza? *b*) Si el bloque se desliza hasta el borde de la mesa, ¿qué fuerza neta actuaría sobre el bloque justo después de rebasar el borde (sin la fuerza aplicada).

Sugerencia para resolver problemas

No hay una sola forma fija de resolver los problemas; sin embargo, sí hay estrategias o procedimientos generales que ayudan a resolverlos, sobre todo aquellos donde interviene la segunda ley de Newton. Al utilizar nuestros procedimientos sugeridos para resolver problemas, presentados en el capítulo 1, incluiríamos los pasos siguientes cuando se trata de resolver problemas de aplicación de fuerzas:

- Elabore un diagrama de cuerpo libre para cada cuerpo individual, mostrando todas las fuerzas que actúan sobre ese cuerpo.
- Dependiendo de lo que se pida, aplique la segunda ley de Newton al sistema en su totalidad (en cuyo caso se anulan las fuerzas internas) o a una parte del sistema. Básicamente, *buscamos una ecuación (o conjunto de ecuaciones) que contenga la cantidad que queremos despejar*. Repase el ejemplo 4.3. (Si hay dos incógnitas, la aplicación de la segunda ley de Newton a dos partes del sistema podría dar dos ecuaciones con dos incógnitas. Véase el ejemplo 4.6.)
- Debemos tener presente que la segunda ley de Newton puede aplicarse a componentes de aceleración, y que las fuerzas se pueden descomponer para hacerlo. Repase el ejemplo 4.7.

Equilibrio traslacional

Es posible que varias fuerzas actúen sobre un objeto sin producir una aceleración. En tal caso, con $\vec{\mathbf{a}} = 0$, por la segunda ley de Newton sabemos que

$$\sum \vec{\mathbf{F}}_i = 0 \qquad (4.4)$$

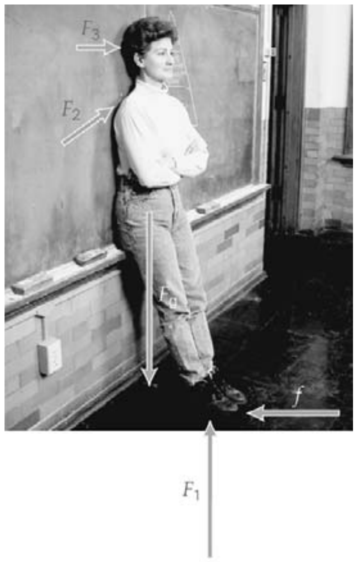
Es decir, la suma vectorial de las fuerzas, o fuerza neta, es cero, y el objeto permanece en reposo (como en la ▸figura 4.14), *o bien* se mueve con velocidad constante. En tales casos, decimos que los objetos están en **equilibrio traslacional**. Si permanece en reposo, decimos que el objeto está en *equilibrio traslacional estático*.

De lo anterior se sigue que las sumas de los componentes rectangulares de las fuerzas que actúan sobre un objeto en equilibrio traslacional también son cero (¿por qué?):

$$\left.\begin{aligned}\sum F_x &= 0\\ \sum F_y &= 0\end{aligned}\right\} \quad \textit{(sólo en equilibrio traslacional)} \qquad (4.5)$$

En problemas tridimensionales $\sum F_z = 0$. Sin embargo, restringiremos nuestras explicaciones al caso bidimensional.

Las ecuaciones 4.5 dan lo que se conoce como **condición para equilibrio traslacional**. (En el capítulo 8 veremos las condiciones para consideraciones rotacionales.) Apliquemos esta condición del equilibrio traslacional a un caso de equilibrio estático.



a)

b)

▲ **FIGURA 4.14 Muchas fuerzas, cero aceleración** ***a)*** Sobre esta profesora de física actúan por lo menos cinco fuerzas externas distintas. (Aquí, *f* es la fuerza de fricción.) No obstante, ella no experimenta aceleración alguna. ¿Por qué? ***b)*** La suma de los vectores de fuerza con el método del polígono revela que la suma vectorial de las fuerzas es cero. La profesora está en equilibrio traslacional estático. (También está en equilibrio rotacional estático; en el capítulo 8 veremos por qué.)

Ejemplo 4.8 ■ Mantenerse derecho: en equilibrio estático

Para mantener un hueso de la pierna roto en posición recta mientras sana, algunas veces se requiere tratamiento por *extensión*, que es el procedimiento mediante el cual se mantiene el hueso bajo fuerzas de tensión de estiramiento en ambos extremos para tenerlo alienado. Imagine una pierna bajo la tensión del tratamiento como en la ▾figura 4.15. El cordel está unido a una masa suspendida de 5.0 kg y pasa por una polea. El cordel unido arriba de la polea forma un ángulo de $\theta = 40°$ con la vertical. Ignorando la masa de la parte inferior de la pierna y de la polea, y suponiendo que todos los cordeles son ideales, determine la magnitud de la tensión en el cordel horizontal.

Razonamiento. La polea está en equilibrio estático y, por ende, ninguna fuerza neta actúa sobre ella. Si las fuerzas se suman horizontal y verticalmente, independientemente deberían dar cero, lo cual ayudaría a encontrar la tensión sobre el cordel horizontal.

Dado: con los datos listados: $m = 5.0$ kg, $\theta = 40°$ ***Encuentre:*** T en el cordel horizontal

Solución. Trace los diagramas de cuerpo libre para la polea y las masas suspendidas (figura 4.15). Debería ser claro que el cordel horizontal tiene que ejercer una fuerza a la izquierda sobre la polea como se indica. Al sumar las fuerzas verticales sobre m, vemos que $T_1 = mg$. Al sumar las fuerzas verticales sobre la polea, tenemos

$$\sum F_y = +T_2 \cos\theta - T_1 = 0$$

y al sumar las fuerzas horizontales:

$$\sum F_x = +T_2 \operatorname{sen}\theta - T = 0$$

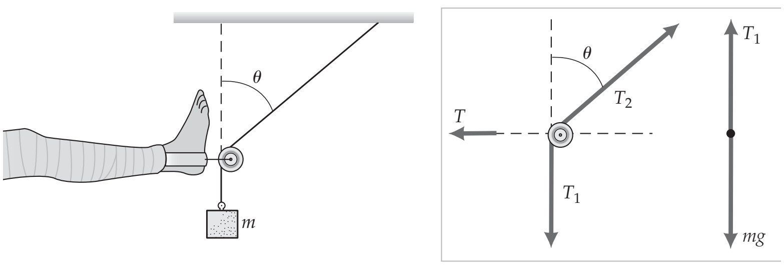
Despejando T de la ecuación anterior y sustituyendo T_2 de la primera:

$$T = T_2 \operatorname{sen}\theta = \frac{T_1}{\cos\theta}\operatorname{sen}\theta = mg\tan\theta$$

donde $T_1 = mg$. Puesto en números,

$$T = mg\tan\theta = (5.0\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)\tan 40° = 41\ \text{N}$$

Ejercicio de refuerzo. Suponga que la atención médica requiere una fuerza del tratamiento de 55 N sobre el talón. Manteniendo la masa suspendida de la misma forma, ¿se incrementaría o disminuiría el ángulo del cordel superior? Demuestre su respuesta calculando el ángulo que se pide.



◀ **FIGURA 4.15 Equilibrio trasnacional estático** Véase el ejemplo 4.8

Ejemplo 4.9 ■ De puntillas: en equilibrio estático

Un individuo de 80 kg se para en un solo pie con el talón levantado (▼figura 4.16a). Esto genera una fuerza de la tibia F_1 y una fuerza "que tira" del tendón de Aquiles F_2, como se ilustra en la figura 4.16b. En un caso típico, los ángulos son $\theta_1 = 15°$ y $\theta_2 = 21°$, respectivamente. *a*) Deduzca ecuaciones generales para F_1 y F_2, y demuestre que θ_2 debe ser mayor que θ_1 para evitar que se dañe el tendón de Aquiles. *b*) Compare la fuerza sobre el tendón de Aquiles con el peso de la persona.

Razonamiento. Se trata de un caso de equilibrio traslacional estático, así que podemos sumar los componentes *x* y *y* para obtener ecuaciones para F_1 y F_2.

Solución. La lista de lo que se nos da y lo que se nos pide es,

Dado: $m = 80$ kg
F_1 = fuerza de la tibia
F_2 = "tirón" del tendón
$\theta_1 = 15°, \theta_2 = 21°$
(La masa del pie m_f no se conoce.)

Encuentre: *a*) ecuaciones generales para F_1 y F_2
b) comparación de F_2 y el repaso del individuo

***a*)** Suponemos que el individuo de masa *m* está en reposo, parado sobre un pie. Por lo tanto, al sumar los componentes de la fuerza sobre el pie tenemos,

$$\sum F_x = +F_1 \operatorname{sen} \theta_1 - F_2 \operatorname{sen} \theta_2 = 0$$

$$\sum F_y = +N - F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 - m_f g = 0$$

donde m_f es la masa del pie. De la ecuación para F_x, tenemos

$$F_1 = F_2 \left(\frac{\operatorname{sen} \theta_2}{\operatorname{sen} \theta_1} \right) \tag{1}$$

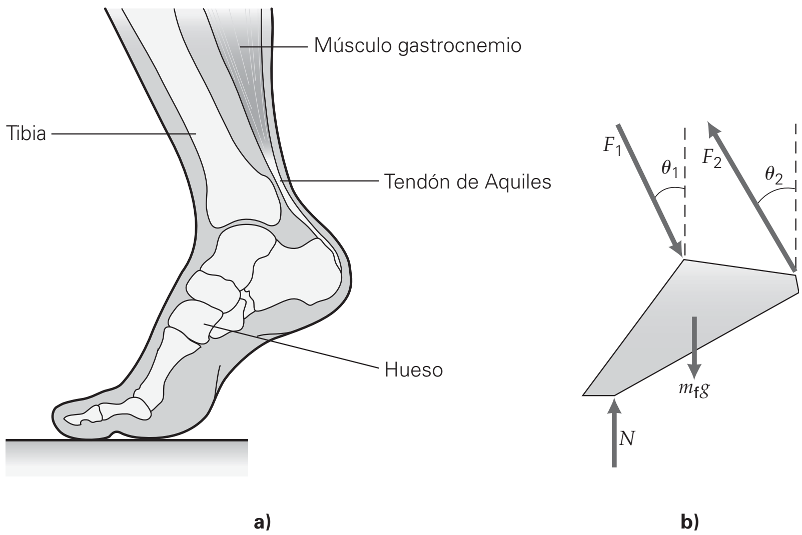
Sustituyendo en la ecuación para F_y, obtenemos,

$$N - F_2 \left(\frac{\operatorname{sen} \theta_2}{\operatorname{sen} \theta_1} \right) \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 - m_f g = 0$$

Con $N = mg$, despejamos F_2 para obtener,

$$F_2 = \frac{N - m_f g}{\left(\frac{\operatorname{sen} \theta_2}{\tan \theta_1} \right) - \cos \theta_2} = \frac{mg - m_f g}{\cos \theta_2 \left(\frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} - 1 \right)} \tag{2}$$

▼ **FIGURA 4.16 De puntillas** ***a*)** Una persona se para en un pie con el talón levantado. ***b*)** Las fuerzas que intervienen en esta posición (que no está a escala). Véase el ejemplo 4.9.



Luego, al examinar F_2 en la ecuación 2, vemos que si $\theta_2 = \theta_1$ o $\tan\theta_2 = \tan\theta_1$, F_2 es muy grande. (¿Por qué?) Entonces, para que la fuerza sea finita, $\tan\theta_2$ debe ser mayor que $\tan\theta_1$ o sea, $\theta_2 > \theta_1$. Dado que $21° > 15°$, vemos que evidentemente la naturaleza sabe de física.

Entonces, al sustituir F_2 en la ecuación 1 para calcular F_1,

$$F_1 = F_2\left(\frac{\operatorname{sen}\theta_2}{\operatorname{sen}\theta_1}\right) = \left[\frac{(m - m_f)g}{\cos\theta_2\left(\dfrac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1}\right) - 1}\right]\left(\frac{\operatorname{sen}\theta_2}{\operatorname{sen}\theta_1}\right)$$

$$= \frac{(m - m_f)g\tan\theta_2}{\left(\dfrac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1} - 1\right)\operatorname{sen}\theta_1} = \frac{\tan\theta_2\,(m - m_f)g}{\cos\theta_1\tan\theta_2 - \operatorname{sen}\theta_1}$$

(Verifica la manipulación trigonométrica de este último paso.)

b) El peso de la persona es $w = mg$, donde m es la masa del cuerpo de la persona. Esto se compara con F_2. Entonces, con $m \gg m_f$ (la masa total del cuerpo es mayor que la masa del pie), para una buena aproximación, m_f puede ser despreciable en comparación con m, es decir, $w - m_f g = mg - m_f g \approx w$. Así, para F_2

$$F_2 = \frac{w - m_f g}{\cos\theta_2\left(\dfrac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1} - 1\right)} \approx \frac{w}{\cos 21°\left(\dfrac{\tan 21°}{\tan 15°} - 1\right)} = 2.5w$$

Por lo que la fuerza sobre el tendón de Aquiles es aproximadamente 2.5 veces el peso del individuo. Con razón la gente se distiende o desgarra este tendón, ¡incluso sin saltar!

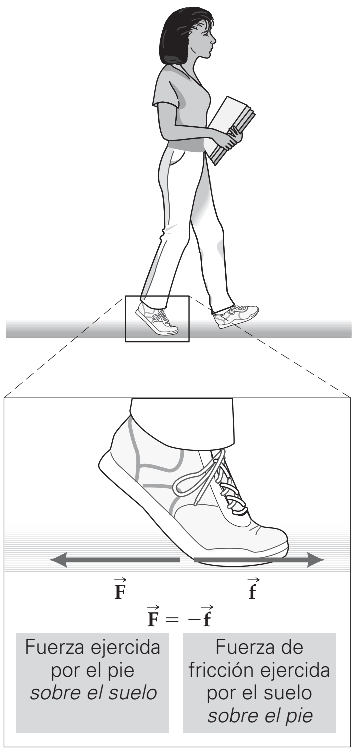
Ejercicio de refuerzo. *a*) Compare la fuerza de la tibia con el peso de la persona. *b*) Suponga que la persona salta hacia arriba desde la posición de puntillas en un pie (como cuando se lanza el balón después de un salto con carrera en el baloncesto). ¿Cómo afectaría este salto a F_1 y F_2?

4.6 Fricción

OBJETIVOS: Explicar *a*) las causas de la fricción y *b*) cómo se describe la fricción empleando coeficientes de fricción.

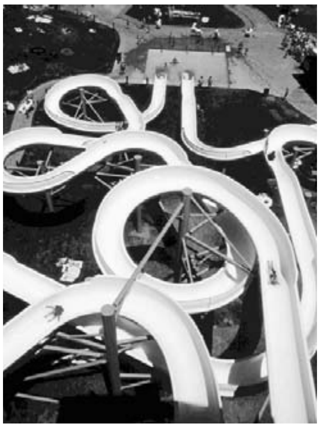
La fricción se refiere a la omnipresente resistencia al movimiento que se da cuando dos materiales o medios están en contacto. Esta resistencia existe con todos los tipos de medios —sólidos, líquidos y gases—, y se caracteriza como **fuerza de fricción** (f). Por sencillez, hasta ahora por lo general hemos ignorado todos los tipos de fricción (incluida la resistencia del aire) en los ejemplos y problemas. Ahora que sabemos cómo describir el movimiento, estamos listos para considerar situaciones más realistas, que incluyen los efectos de la fricción.

En algunas situaciones reales, nos interesa aumentar la fricción; por ejemplo, al echar arena en un camino o una acera congelados, para mejorar la tracción. Esto parecería contradictorio, pues cabría suponer que un aumento en la fricción aumentaría la resistencia al movimiento. Casi siempre decimos que la fricción se opone al movimiento, y que la fuerza de fricción está en la dirección opuesta al movimiento. Sin embargo, consideremos las fuerzas que intervienen en la acción de caminar, que se ilustra en la ▸figura 4.17. De hecho la fuerza de fricción se resiste al movimiento (el del pie); pero está en la dirección del movimiento (caminar). Sin fricción, el pie se deslizaría hacia atrás. (Pensemos en lo que pasaría al caminar sobre una superficie muy resbalosa.) También considere a un trabajador que está de pie sobre el centro de la plataforma de un camión que acelera hacia adelante. Si no hay fricción entre los zapatos del trabajador y la plataforma del camión, aquél se deslizaría hacia atrás. Evidentemente, sí hay fricción entre los zapatos y la plataforma, lo cual evita que él se deslice hacia atrás y hace que se mueva hacia adelante.



▲ **FIGURA 4.17** Fricción al caminar Se muestra la fuerza de fricción, $\vec{\mathbf{f}}$, en la dirección del movimiento al caminar. La fuerza de fricción impide que el pie se deslice hacia atrás mientras el otro pie se lleva hacia adelante. Si caminamos sobre una alfombra mullida, $\vec{\mathbf{F}}$ se hace evidente porque sus hebras se doblan hacia atrás.

a)



b)

▲ **FIGURA 4.18** Aumento y reducción de la fricción
a) Para arrancar rápidamente, los autos de arrancones necesitan asegurarse de que sus neumáticos no se deslicen cuando el semáforo de salida se encienda y pisen a fondo el acelerador. Por ello, tratan de aumentar al máximo la fricción entre sus neumáticos y la pista, "quemándolos" justo antes del inicio de la carrera. Esto se hace girando las ruedas con los frenos aplicados hasta que los neumáticos se calientan mucho. El caucho se vuelve tan pegajoso que casi se suelda a la superficie de la pista. ***b)*** El agua es un buen lubricante para reducir la fricción en juegos de parques de diversiones.

De manera que hay situaciones en que se desea la fricción (◂figura 4.18a) y situaciones en que es necesario reducirla (figura 4.18b). Por ejemplo, lubricamos las piezas móviles de las máquinas para que puedan moverse más libremente, con lo cual se reducen el desgaste y el gasto de energía. Los automóviles no podrían funcionar sin aceites y grasas que reduzcan la fricción.

En esta sección, nos ocupamos principalmente de la fricción entre superficies sólidas. Todas las superficies son microscópicamente ásperas, por más lisas que se vean o se sientan. Originalmente se pensó que la fricción se debía primordialmente al embonamiento mecánico de irregularidades *superficiales* (asperezas o puntos salientes). Sin embargo, las investigaciones han demostrado que la fricción entre las superficies en contacto de los sólidos ordinarios (y sobre todo de los metales) se debe en su mayoría a la adherencia local. Cuando dos superficies se juntan bajo presión, ocurre un soldado o pegado local en unas cuantas áreas pequeñas, donde las asperezas más grandes hacen contacto. Para superar esta adherencia local, debe aplicarse una fuerza lo bastante grande como para separar las regiones pegadas.

Por lo general la fricción entre sólidos se clasifica en tres tipos: estática, deslizante (cinética) y rodante. La **fricción estática** incluye todos los casos en que la fuerza de fricción es suficiente para impedir un movimiento relativo entre las superficies. Suponga que usted desea mover un escritorio grande. Lo empuja, pero el escritorio no se mueve. La fuerza de fricción estática entre las patas del escritorio y el piso se opone a la fuerza horizontal que está aplicando y la anula, por lo que no hay movimiento: hay una condición estática.

Sucede **fricción deslizante** o **cinética** cuando hay un movimiento (deslizamiento) relativo en la interfaz de las superficies en contacto. Al continuar empujando el escritorio, al final usted logrará deslizarlo, pero todavía hay mucha resistencia entre las patas del escritorio y el piso: hay fricción cinética.

La **fricción de rodamiento** se presenta cuando una superficie gira conforme se mueve sobre otra superficie; aunque no desliza ni resbala en el punto o área de contacto. La fricción de rodamiento, como la que se da entre la rueda de un tren y el riel, se atribuye a deformaciones locales pequeñas en la región de contacto. Este tipo de fricción es difícil de analizar y no la veremos aquí.

Fuerzas de fricción y coeficientes de fricción

En esta subsección, consideraremos las fuerzas de fricción que actúan sobre objetos estacionarios y en deslizamiento. Esas fuerzas se llaman *fuerza de fricción estática* y *fuerza de fricción cinética* (o *deslizante*), respectivamente. En experimentos, se ha visto que la fuerza de fricción depende tanto de la naturaleza de las dos superficies como de la *carga* (o fuerza normal) que presiona las superficies entre sí. De manera que podemos escribir $f \propto N$. En el caso de un cuerpo en una superficie horizontal, esta fuerza tiene la misma magnitud que el peso del objeto. (¿Por qué?) Sin embargo, como vimos en la figura de Aprender dibujando de la página 116, en un plano inclinado sólo un componente del peso contribuye a la carga.

La fuerza de fricción estática (f_s) entre superficies en contacto actúa en la dirección que se opone al inició de un movimiento relativo entre las superficies. La magnitud tiene diferentes valores, tales que

$$f_s \leq \mu_s N \quad \textit{(condiciones estáticas)} \tag{4.6}$$

donde $\boldsymbol{\mu_s}$ es una constante de proporcionalidad llamada el **coeficiente de fricción estática**. (μ es la letra griega "mu". Se trata de una constante adimensional. ¿Cómo lo sabemos por la ecuación?)

El signo de menor o igual ($\leq$) indica que la fuerza de fricción estática podría tener valores o magnitudes diferentes, desde cero hasta cierto valor máximo. Para entender este concepto, examinemos la ▸figura 4.19. En la figura 4.19a, alguien empuja un archivero, pero no logra moverlo. Como no hay aceleración, la fuerza neta sobre el archivero es cero, y $F - f_s = 0$, es decir, $F = f_s$. Supongamos que una segunda persona también empuja, y el archivero sigue sin ceder. Entonces, f_s debe ser mayor ahora, porque se incrementó la fuerza aplicada. Por último, si la fuerza aplicada es lo bastante grande como para vencer la fricción estática, hay movimiento (figura 4.19c).

La fuerza de fricción estática mayor, o máxima, se ejerce justo antes de que el archivero comience a deslizarse (figura 4.19b) y, en tal caso, la ecuación 4.6 da el valor máximo de fricción estática:

$$f_{s_{máx}} = \mu_s N \tag{4.7}$$

Una vez que un objeto se desliza, la fuerza de fricción cambia a fricción cinética (f_k). Esta fuerza actúa en la dirección opuesta a la dirección del movimiento y su magnitud es

$$f_k = \mu_k N \quad \textit{(condiciones de deslizamiento)} \tag{4.8}$$

donde $\boldsymbol{\mu_k}$ es el **coeficiente de fricción cinética** (también llamado *coeficiente de fricción deslizante*). Observe que las ecuaciones 4.7 y 4.8 *no* son vectoriales, porque f y N tienen diferente dirección. En general el coeficiente de fricción cinética es menor que el coe-

▼ **FIGURA 4.19 Fuerza de fricción contra fuerza aplicada** ***a)*** En la región estática de la gráfica, a medida de que se incrementa la fuerza aplicada F, también lo hace f_s; esto es, $f_s = F$ y $f_s < m_s N$. ***b)*** Cuando la fuerza aplicada F excede $f_{s_{máx}} = \mu_s N$, el pesado archivero se pone en movimiento. ***c)*** Una vez que el archivero se mueve, disminuye la fuerza de fricción, ya que la fricción cinética es menor que la fricción estática ($f_k < f_{s_{máx}}$). Por lo tanto, si se mantiene la fuerza aplicada, habrá una fuerza neta y el archivero acelerará. Para que el archivero se mueva con velocidad constante, la fuerza aplicada deberá reducirse hasta igualar la fuerza de fricción cinética: $f_k = \mu_k N$.

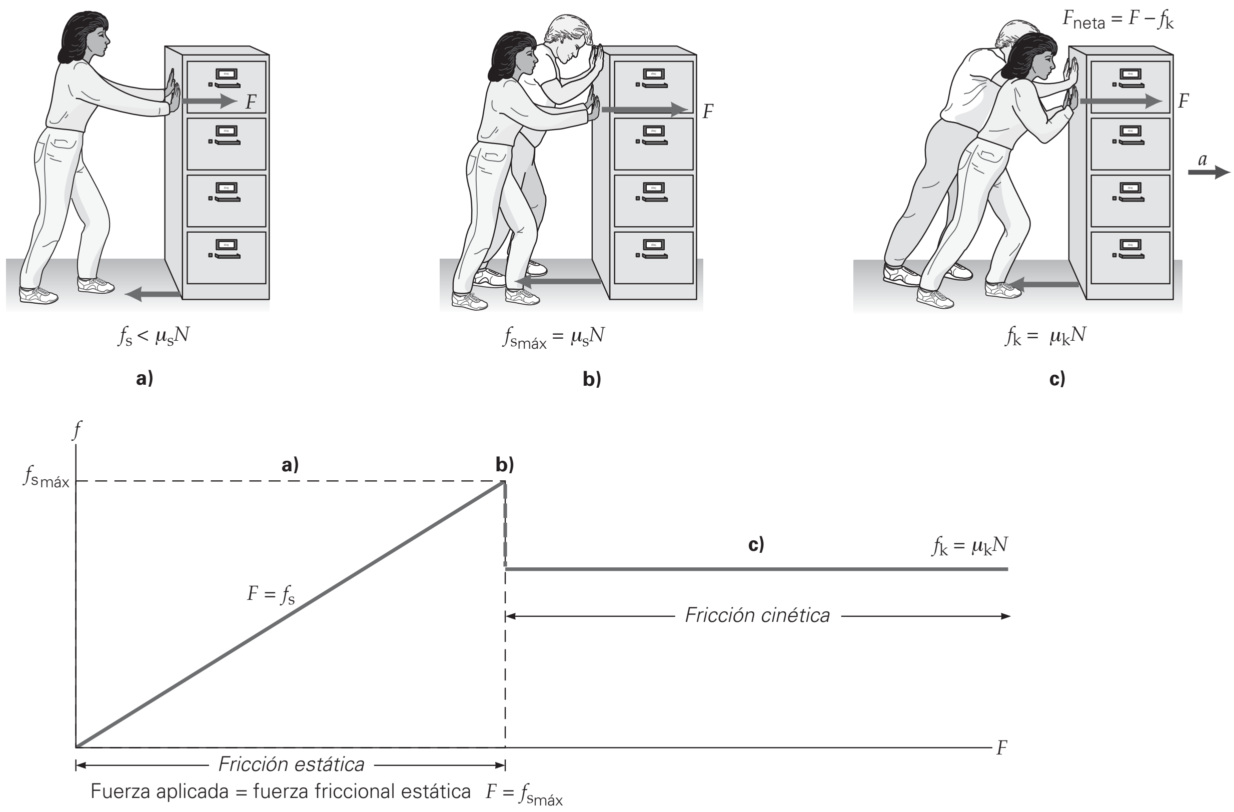


TABLA 4.1 **Valores aproximados de coeficientes de fricción estática y fricción cinética entre ciertas superficies**

Fricción entre materiales	μ_s	μ_k
Aluminio sobre aluminio	1.90	1.40
Vidrio sobre vidrio	0.94	0.35
Caucho sobre concreto		
seco	1.20	0.85
mojado	0.80	0.60
Acero sobre aluminio	0.61	0.47
Acero sobre acero		
seco	0.75	0.48
lubricado	0.12	0.07
Teflón sobre acero	0.04	0.04
Teflón sobre teflón	0.04	0.04
Madera encerada sobre nieve	0.05	0.03
Madera sobre madera	0.58	0.40
Cojinetes de bola lubricados	<0.01	<0.01
Articulaciones sinoviales (en los extremos de casi todos los huesos largos; p. ej., codos y caderas)	0.01	0.01

ficiente de fricción estática ($\mu_k < \mu_s$), lo que significa que la fuerza de fricción cinética es menor que $f_{s_{máx}}$. En la tabla 4.1 se dan los coeficientes de fricción entre algunos materiales comunes.

PHYSLET®

Ilustración 5.1 Fricción estática y fricción cinética

Observe que la fuerza de fricción estática (f_s) existe en respuesta a una fuerza aplicada. La magnitud de f_s y su dirección dependen de la magnitud y dirección de la fuerza aplicada. Hasta su valor máximo, la fuerza de fricción estática es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza aplicada (F), ya que no hay aceleración ($F - f_s = ma = 0$). Por lo tanto, si la persona de la figura 4.19a empujara el archivero en la dirección opuesta, f_s cambiaría para oponerse al nuevo empujón. Si no hubiera fuerza aplicada F, entonces f_s sería cero. Cuando la magnitud de F excede $f_{s_{máx}}$, el archivero comienza a moverse (se acelera) y entra en acción la fricción cinética, con $f_k = m_k N$. Si F se reduce a f_k, el archivero se deslizará con velocidad constante; si F se mantiene en un valor mayor que f_k, el archivero seguirá acelerando.

Se ha determinado experimentalmente que los coeficientes de fricción (y por ende las fuerzas de fricción) son casi independientes del tamaño del área de contacto entre superficies metálicas. Esto significa que la fuerza de fricción entre un bloque metálico con forma de tabique y una superficie metálica es la misma, sin importar que el bloque esté descansando sobre su lado más ancho o sobre el más angosto.

Por último, hay que tener en cuenta que, si bien la ecuación $f = \mu N$ se cumple en general para las fuerzas de fricción, la fricción podría no ser lineal. Es decir, μ no siempre es constante. Por ejemplo, el coeficiente de fricción cinética varía un poco con la velocidad relativa de las superficies. Sin embargo, para velocidades de hasta varios metros por segundo, los coeficientes son relativamente constantes. Por sencillez, en nuestras explicaciones ignoraremos cualesquiera variaciones debidas a la rapidez (o al área) y supondremos que las fuerzas de fricción estática y dinámica dependen únicamente de la carga (N) y de la naturaleza de los materiales, expresada en los coeficientes de fricción dados.

Ejemplo 4.10 ■ Tirar de una caja: fuerzas de fricción estática y cinética

a) En la ▼figura 4.20, si el coeficiente de fricción estática entre la caja de 40.0 kg y el piso es de 0.650, ¿con qué fuerza horizontal mínima debe tirar el trabajador para poner la caja en movimiento? *b*) Si el trabajador mantiene esa fuerza una vez que la caja empiece a moverse, y el coeficiente de fricción cinética entre las superficies es de 0.500, ¿qué magnitud tendrá la aceleración de la caja?

Razonamiento. Este escenario requiere la aplicación de las fuerzas de fricción. En *a*), es preciso calcular la fuerza máxima de fricción estática. En *b*), si el trabajador mantiene una fuerza aplicada de esa magnitud una vez que la caja esté en movimiento, habrá una aceleración, ya que $f_k < f_{s_{máx}}$.

Solución. Listamos los datos dados y lo que se nos pide,

Dado:	$m = 40.0$ kg	***Encuentre:***	*a*) F (fuerza mínima necesaria para mover la caja)
	$\mu_s = 0.650$		*b*) a (aceleración)
	$\mu_k = 0.500$		

***a*)** La caja no se moverá hasta que la fuerza aplicada F exceda ligeramente la fuerza máxima de fricción estática, $f_{s_{máx}}$. Por lo tanto, debemos calcular $f_{s\text{máx}}$ para determinar qué fuerza debe aplicar el trabajador. El peso de la caja y la fuerza normal tienen la misma magnitud en este caso (véase el diagrama de cuerpo libre de la figura 4.20), de manera que la fuerza máxima de fricción estática es

$$\begin{aligned} f_{s_{max}} &= \mu_s N = \mu_s\,(mg) \\ &= (0.650)(40.0\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2) = 255\text{ N} \end{aligned}$$

Entonces, la caja se moverá si la fuerza aplicada F excede 255 N.

***b*)** Ahora la caja está en movimiento, y el trabajador mantiene una fuerza aplicada constante $F = f_{s_{máx}} = 255$ N. La fuerza de fricción cinética f_k actúa sobre la caja; pero esta fuerza es menor que la fuerza aplicada F, porque $\mu_k < \mu_s$. Por lo tanto, hay una fuerza neta sobre la caja, y podemos obtener la aceleración de la caja utilizando la segunda ley de Newton en la dirección x:

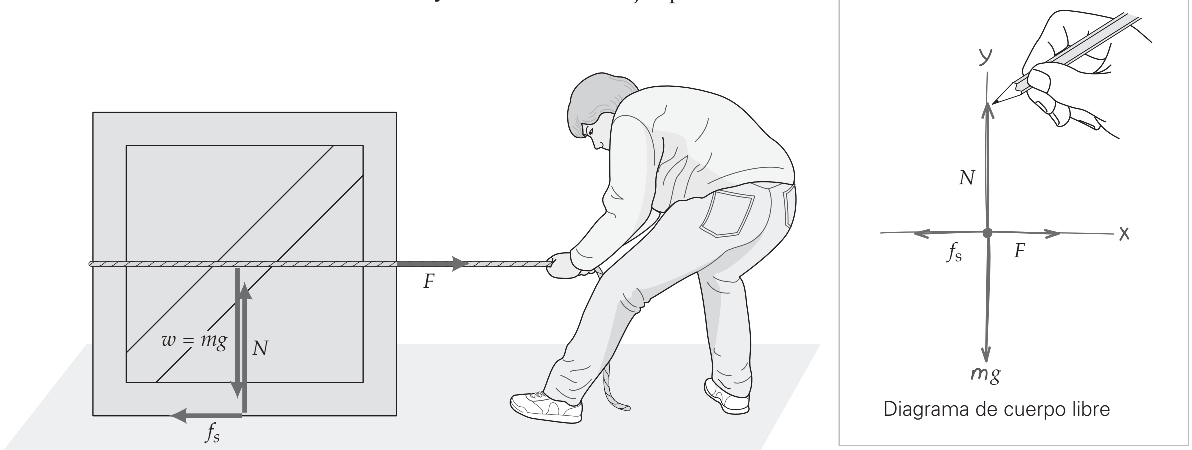
$$\Sigma F_x = +F - f_k = F - \mu_k N = ma_x$$

Despejamos a_x y obtenemos

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{F - \mu_k N}{m} = \frac{F - \mu_k\,(mg)}{m} \\ &= \frac{255\text{ N} - (0.500)(40.0\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2)}{40.0\text{ kg}} = 1.48\text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Ejercicio de refuerzo. En promedio, ¿por qué factor μ_s es mayor que μ_k para superficies no lubricadas de metal sobre metal? (Véase la tabla 4.1.)

▼ **FIGURA 4.20 Fuerzas de fricción estática y cinética** Véase el ejemplo 4.10.



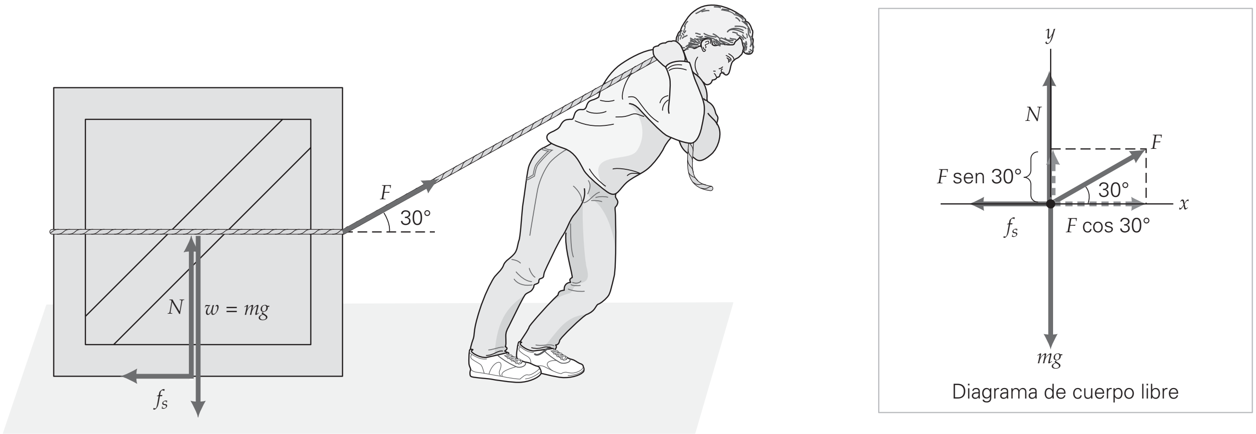


FIGURA 4.21 Tirar en dirección inclinada: un análisis más profundo de la fuerza normal
Véase ejemplo 4.11.

Veamos a otro trabajador con la misma caja; pero ahora supongamos que el trabajador aplica la fuerza con cierto ángulo (figura 4.21).

Ejemplo 4.11 ■ Tirar en dirección inclinada: un análisis más profundo de la fuerza normal

Un trabajador que tira de una caja aplica una fuerza con un ángulo de 30º respecto a la horizontal, como se muestra en la figura 4.21. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza mínima que deberá aplicar para mover la caja? (Antes de ver la solución, ¿usted cree que la fuerza requerida en este caso sea mayor o menor que la del ejemplo 4.10?)

Razonamiento. Vemos que la fuerza aplicada forma un ángulo con la superficie horizontal, así que el componente vertical afectará la fuerza normal. (Véase la figura 4.11.) Este cambio en la fuerza normal, a la vez, afectará la fuerza máxima de fricción estática.

Solución. Los datos son los mismos que en el ejemplo 4.10, excepto que la fuerza se aplica de forma inclinada.

Dado: $\theta = 30°$ ***Encuentre:*** F (fuerza mínima necesaria para mover la caja)

En este caso, la caja se empezará a mover cuando el *componente horizontal* de la fuerza aplicada, F cos 30º, exceda ligeramente la fuerza máxima de fricción estática. Por lo tanto, escribimos lo siguiente para la fricción máxima:

$$F \cos 30° = f_{s_{\text{máx}}} = \mu_s N$$

Sin embargo, en este caso la magnitud de la fuerza normal no es igual al peso de la caja, debido al componente hacia arriba de la fuerza aplicada. (Véase el diagrama de cuerpo libre de la figura 4.21.) Por la segunda ley de Newton, dado que $a_y = 0$, tenemos

$$\Sigma F_y = +N + F \text{ sen } 30° - mg = 0$$

es decir,

$$N = mg - F \text{ sen } 30°$$

Efectivamente, la fuerza aplicada sostiene parcialmente el peso de la caja. Si sustituimos esta expresión para N en la primera ecuación, tenemos

$$F \cos 30° = \mu_s(mg - F \text{ sen } 30°)$$

Y al despejar F,

$$F = \frac{mg}{(\cos 30°/\mu_s) + \text{sen } 30°}$$

$$= \frac{(40.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{(0.866/0.650) + 0.500} = 214 \text{ N}$$

Por lo tanto, se necesita una fuerza aplicada menor en este caso, porque la fuerza de fricción es menor al ser menor la fuerza normal.

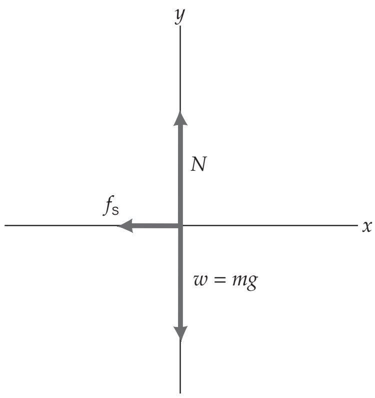
Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, note que la aplicación angulada de la fuerza produce dos efectos. Conforme se incrementa el ángulo entre la fuerza aplicada y la horizontal, se reduce el componente horizontal de la fuerza aplicada. No obstante, la fuerza normal también se reduce, así que $f_{s_{máx}}$ también disminuye. ¿Un efecto siempre supera al otro? Esto es, ¿la fuerza aplicada F necesaria para mover la caja siempre disminuye al aumentar el ángulo? (*Sugerencia:* investigue F para diferentes ángulos. Por ejemplo, calcule F para 20º y 50º. Ya tiene un valor para 30º. ¿Qué le dicen los resultados?

Ejemplo 4.12 ■ No hay desliz: fricción estática

Una caja está en el centro de la plataforma de carga de un camión que viaja a 80 km/h por una carretera recta y plana. El coeficiente de fricción estática entre la caja y la plataforma del camión es de 0.40. Cuando el camión frena uniformemente hasta detenerse, la caja no resbala sino que se mantiene inmóvil en el camión. ¿En qué distancia mínima puede frenar el camión sin que la caja se deslice sobre la plataforma?

Razonamiento. Tres fuerzas actúan sobre la caja, como se muestra en el diagrama de cuerpo libre de la ▸figura 4.22 (suponiendo que el camión viaja inicialmente en la dirección $+x$). Pero, ¡espere! Hay una fuerza neta en la dirección $-x$, así que debería haber una aceleración en esa dirección ($a_x < 0$). ¿Qué significa esto? Que en relación con el suelo, la caja está desacelerando con la misma tasa que el camión, lo cual es necesario para que la caja no resbale: la caja y el camión frenan juntos uniformemente.

La fuerza que crea esta aceleración para la caja es la fuerza de fricción estática. La aceleración se obtiene aplicando la segunda ley de Newton y luego se emplea en una de las ecuaciones de cinemática para calcular la distancia.



▲ **FIGURA 4.22** Diagrama de cuerpo libre Véase el ejemplo 4.12.

Solución.

Dado: $v_{x_o} = 80 \text{ km/h} = 22 \text{ m/s}$
$\mu_s = 0.40$

Encuentre: distancia mínima para detenerse

Aplicamos la segunda ley de Newton a la caja, con el valor máximo de f_s para encontrar la distancia mínima para detenerse,

$$\Sigma F_x = -f_{s_{máx}} = -\mu_s N = -\mu_s mg = ma_x$$

Ahora despejamos a_x,

$$a_x = -\mu_s g = -(0.40)(9.8 \text{ m/s}^2) = -3.9 \text{ m/s}^2$$

que es la desaceleración máxima del camión con la que la caja no se resbala.

Por lo tanto, la distancia de detención mínima (x) del camión se basará en esta aceleración y estará dada por la ecuación 2.12, donde $v_x = 0$ y tomamos x_o como el origen. Entonces,

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

Ahora despejamos x:

$$x = \frac{v_{x_o}^2}{-2a_x} = \frac{(22 \text{ m/s})^2}{-2(-3.9 \text{ m/s}^2)} = 62 \text{ m}$$

¿Es razonable la respuesta? Esta longitud es aproximadamente dos tercios de un campo de fútbol americano.

Ejercicio de refuerzo. Dibuje un diagrama de cuerpo libre y describa lo que sucede en términos de aceleraciones y coeficientes de fricción, si la caja comienza a deslizarse hacia adelante cuando el camión está frenando (en otras palabras, si a_x excede -3.9 m/s^2).

Resistencia del aire

La **resistencia del aire** se refiere a la fuerza de resistencia que actúa sobre un objeto cuando se mueve a través del aire. Dicho de otro modo, la resistencia del aire es un tipo de fuerza de fricción. En los análisis de objetos que caen, por lo general omitimos el efecto de la resistencia del aire y aun así obtenemos aproximaciones válidas en caídas desde distancias relativamente cortas. Sin embargo, en caídas más largas no es posible despreciar la resistencia del aire.

▲ **FIGURA 4.23 Superficie aerodinámica** La superficie sobre el techo de la cabina de este camión hace aerodinámico al vehículo y así reduce la resistencia del aire, volviéndolo más eficiente.

La resistencia del aire sucede cuando un objeto en movimiento choca contra moléculas de aire. Por lo tanto, la resistencia del aire depende de la forma y el tamaño del objeto (que determinan el área del objeto que está expuesta a choques), así como su rapidez. Cuanto más grande sea el objeto, y más rápido se mueva, mayor será el número de moléculas de aire contra las que chocará. (La densidad del aire es otro factor, pero supondremos que esta cantidad es constante cerca de la superficie de la Tierra.) Para reducir la resistencia del aire (y el consumo de combustible), los automóviles se hacen "más eficientes", y en los camiones y las casas rodantes se instalan superficies aerodinámicas (◂figura 4.23).

Considere un objeto que cae. Puesto que la resistencia del aire depende de la rapidez, conforme un objeto que cae acelera bajo la influencia de la gravedad, la fuerza retardante de la resistencia del aire aumenta (▾figura 4.24a). La resistencia del aire para objetos del tamaño del cuerpo humano es proporcional al cuadrado de la rapidez, v^2, por lo que la resistencia aumenta con mucha rapidez. Así, cuando la rapidez se duplica, la resistencia del aire se incrementa por un factor de 4. En algún momento, la magnitud de la fuerza retardante es igual a la del peso del objeto (figura 4.24b), de manera que la fuerza neta sobre el objeto es cero. A partir de ese momento, el objeto cae con una velocidad máxima constante, llamada **velocidad terminal**, con magnitud v_t.

Es fácil ver esto con la ayuda de la segunda ley de Newton. Para el objeto que cae, tenemos

$$F_{\text{neta}} = ma$$

es decir,

$$mg - f = ma$$

donde, por conveniencia, la dirección hacia abajo se ha tomado como positiva. Al despejar a, tenemos

$$a = g - \frac{f}{m}$$

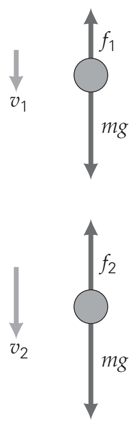
donde a es la magnitud de la aceleración instantánea hacia abajo.

Note que la aceleración de un objeto que cae, si tomamos en cuenta la resistencia del aire, es menor que g; es decir, $a < g$. Si el objeto sigue cayendo, su rapidez aumentará y, por ende, aumentará la fuerza de resistencia del aire f (porque depende de la rapidez), hasta que $a = 0$, cuando $f = mg$ y $f - mg = 0$. Entonces, el objeto cae con velocidad terminal constante.

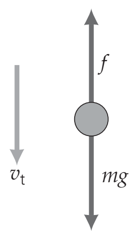
PHYSLET®
Ilustración 5.5 Fricción del aire

Para un paracaidista que no ha abierto su paracaídas, la velocidad terminal es de unos 200 km/h (cerca de 125 mi/h). Para reducir la velocidad terminal a fin de alcanzarla antes y prolongar el tiempo de caída, el paracaidista trata de aumentar al máximo el área expuesta de su cuerpo, adoptando una posición extendida (▸figura 4.25). Esta posición aprovecha que la resistencia del aire depende del tamaño y la forma del objeto que cae. Una vez que se abre el paracaídas (que tiene una área expuesta mayor y una forma que atrapa el aire), la resistencia adicional al aire frena al paracaidista a cerca de 40 km/h (25 mi/h), la cual es preferible para aterrizar.

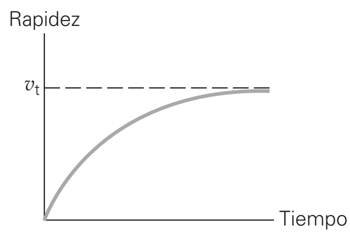
▼ **FIGURA 4.24 Resistencia del aire y velocidad terminal** ***a)*** A medida que aumenta la rapidez con que un objeto cae, también se incrementa la fuerza de fricción de la resistencia del aire. ***b)*** Cuando esta fuerza de fricción es igual al peso del objeto, la fuerza neta es cero, y el objeto cae con una velocidad (terminal) constante. ***c)*** Gráfica de rapidez contra tiempo que muestra estas relaciones.



a) Conforme v se incrementa, f también lo hace.



b) Cuando $f = mg$, el objeto cae con velocidad (terminal) constante.



c)

◀ **FIGURA 4.25 Velocidad terminal** Los paracaidistas adoptan una posición extendida para aumentar al máximo la resistencia del aire. Esto hace que alcancen más rápidamente la velocidad terminal y prolonga el tiempo de caída. Aquí se observa una vista de los paracaidistas.

Ejemplo conceptual 4.13 ■ Carrera en descenso: resistencia del aire y velocidad terminal

Desde gran altura, un viajero en globo deja caer simultáneamente dos pelotas de idéntico tamaño, pero de peso muy distinto. Suponiendo que ambas pelotas alcanzan la velocidad terminal durante la caída, ¿qué se cumple? *a*) La pelota más pesada alcanza primero la velocidad terminal; *b*) las pelotas alcanzan al mismo tiempo la velocidad terminal; *c*) la pelota más pesada cae primero al suelo; *d*) las pelotas caen al suelo al mismo tiempo. *Plantee claramente el razonamiento y los principios de física que usó para llegar a su respuesta, antes de leer el párrafo siguiente. Es decir, ¿por qué eligió esa respuesta?*

Razonamiento y respuesta. La velocidad terminal se alcanza cuando el peso de la pelota se equilibra con la resistencia del aire. Ambas pelotas experimentan inicialmente la misma aceleración, g, y su rapidez y las fuerzas retardantes de la resistencia del aire aumentan con la misma tasa. El peso de la pelota más ligera se equilibrará primero, de manera que a y b son incorrectas. La pelota más ligera alcanza primero la velocidad terminal ($a = 0$), pero la pelota más pesada sigue acelerando y se adelanta a la pelota más ligera. Por lo tanto, la pelota más pesada cae primero al suelo, y la respuesta es c, lo cual excluye a d.

Ejercicio de refuerzo. Suponga que la pelota más pesada es mucho más grande que la más ligera. ¿Cómo podría esta diferencia afectar el resultado?

Vemos un ejemplo de velocidad terminal muy a menudo. ¿Por qué las nubes se mantienen aparentemente suspendidas en el cielo? Es indudable que las gotitas de aire o cristales de hielo (nubes altas) deberían caer… y lo hacen. Sin embargo, son tan pequeños que su velocidad terminal se alcanza rápidamente, y caen con tal lentitud que no lo notamos. La flotabilidad en el aire también es un factor (véase el capítulo 9). Además, podría haber corrientes de aire ascendentes que impiden al agua y el hielo llegar al suelo.

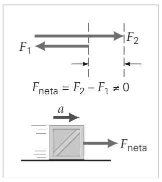
Un uso de la resistencia del "aire" fuera de la Tierra es el *aerofrenado*. Esta técnica aeronáutica utiliza la atmósfera planetaria para frenar una nave espacial en órbita. Cuando la nave pasa a través de la capa superior de la atmósfera planetaria, la "resistencia" atmosférica frena la rapidez de la nave, hasta colocar ésta en la órbita deseada. Se necesitan muchos movimientos, pues la nave debe pasar una y otra vez por la atmósfera hasta alcanzar la órbita final adecuada.

El aerofrenado es una técnica muy útil porque elimina la necesidad de transportar una pesada carga de propulsores químicos, que de otra forma serían indispensables para colocar la nave en órbita. Esto permite que la nave lleve más instrumentos científicos para realizar investigaciones. El aerofrenado se utilizó para ajustar la órbita de la sonda *Odisea* alrededor de Marte en 2001.

Repaso del capítulo

- Una **fuerza** es algo que puede cambiar el estado de movimiento de un objeto. Para producir un cambio en el movimiento, debe haber una fuerza neta, no equilibrada, distinta de cero:

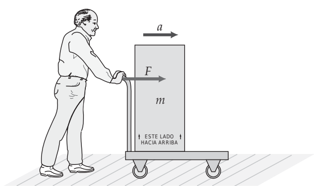
$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}} = \Sigma\vec{\mathbf{F}}_i$$



- La **primera ley de Newton del movimiento** también se denomina **ley de inercia**; inercia es la tendencia natural de los objetos a mantener su estado de movimiento. La ley dice que, en ausencia de una fuerza neta aplicada, un cuerpo en reposo permanece en reposo, y un cuerpo en movimiento permanece en movimiento con velocidad constante.

- La **segunda ley de Newton del movimiento** relaciona la fuerza neta que actúa sobre un objeto o un sistema con la masa (total) y la aceleración resultante. Define la relación de causa y efecto entre fuerza y aceleración:

$$\Sigma\vec{\mathbf{F}}_i = \vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}} = m\vec{\mathbf{a}} \tag{4.1}$$



Una fuerza neta distinta de cero acelera la caja: $a \propto F/m$

La ecuación del **peso** en términos de masa es una forma de la segunda ley de Newton:

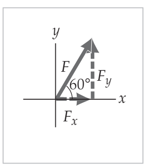
$$w = mg \tag{4.2}$$

La forma de componentes de la segunda ley es:

$$\Sigma(F_x\hat{\mathbf{x}} + F_y\hat{\mathbf{y}}) = m(a_x\hat{\mathbf{x}} + a_y\hat{\mathbf{y}}) = ma_x\hat{\mathbf{x}} + ma_y\hat{\mathbf{y}} \tag{4.3a}$$

y

$$\Sigma F_x = ma_x \quad \text{y} \quad \Sigma F_y = ma_y \tag{4.3b}$$



- La **tercera ley de Newton** indica que, por cada fuerza, hay una fuerza de reacción igual y opuesta. Según la tercera ley, las fuerzas opuestas de un par siempre actúan sobre objetos distintos.

- Decimos que un objeto está en equilibrio traslacional si está en reposo o se mueve con velocidad constante. Si permanece en reposo, decimos que el objeto está en *equilibrio traslacional* estático. La condición de equilibrio traslacional se plantea así

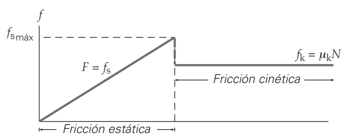
$$\Sigma\vec{\mathbf{F}}_i = 0 \tag{4.4}$$

o bien,

$$\Sigma F_x = 0 \quad \text{y} \quad \Sigma F_y = 0 \tag{4.5}$$

- La fricción es la resistencia al movimiento que se da entre superficies en contacto. (En general, hay fricción entre todo tipo de medios: sólidos, líquidos y gases.)

- La fuerza de fricción entre superficies se caracteriza por coeficientes de fricción (μ), uno para el caso estático y otro para el caso cinético (en movimiento). En muchas situaciones, $f = \mu N$, donde N es la fuerza normal, perpendicular a la superficie (es decir, la fuerza que la superficie ejerce *sobre* el objeto). Al ser un cociente de fuerzas (f/N), m es adimensional.



Fuerza de fricción estática:

$$f_s \leq \mu_s N \tag{4.6}$$

$$f_{s_{\text{máx}}} = \mu_s N \tag{4.7}$$

Fuerza de fricción cinética (deslizante):

$$f_k = \mu_k N \tag{4.8}$$

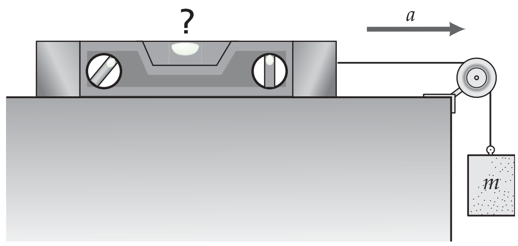
- La fuerza de resistencia del aire sobre un objeto que cae aumenta al aumentar la rapidez. Finalmente, el objeto alcanza una velocidad constante llamada *velocidad terminal*.

Ejercicios*

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

4.1 Los conceptos de fuerza y fuerza neta *y* 4.2 Inercia y la primera ley de Newton del movimiento

1. **OM** La masa está relacionada *a*) con el peso de un objeto, *b*) con su inercia, *c*) con su densidad, *d*) con todas las opciones anteriores.
2. **OM** Una fuerza *a*) siempre genera movimiento, *b*) es una cantidad escalar, *c*) es capaz de producir un cambio en el movimiento, *d*) tanto *a* como *b*.
3. **OM** Si un objeto se mueve a velocidad constante, *a*) debe haber una fuerza en la dirección de la velocidad, *b*) no debe haber fuerza en la dirección de la velocidad, *c*) no debe haber fuerza neta o *d*) debe haber una fuerza neta en la dirección de la velocidad.
4. **OM** Si la fuerza neta sobre un objeto es cero, el objeto podría *a*) estar en reposo, *b*) estar en movimiento a velocidad constante, *c*) tener aceleración cero o *d*) todo lo anterior.
5. **OM** La fuerza requerida para mantener un cohete moviéndose a una velocidad constante en el espacio lejano es *a*) igual al peso de la nave, *b*) dependiente de la rapidez con que se mueve la nave, *c*) igual a la que generan los motores del cohete a media potencia, *d*) cero.
6. **PC** Si un objeto está en reposo, no puede haber fuerzas actuando sobre él. ¿Es correcta esta afirmación? Explique. *b*) Si la fuerza neta sobre un objeto es cero, ¿podemos concluir que el objeto está en reposo? Explique.
7. **PC** En un avión a reacción comercial que despega, sentimos que nos "empujan" contra el asiento. Use la primera ley de Newton para explicar esto.
8. **PC** Un objeto pesa 300 N en la Tierra y 50 N en la Luna. ¿El objeto también tiene menos inercia en la Luna?
9. **PC** Considere un nivel de burbuja que descansa en una superficie horizontal (▾figura 4.26). Inicialmente, la burbuja de aire está en la parte media del tubo horizontal de vidrio. *a*) Si se aplica al nivel una fuerza para acelerarlo, ¿en qué dirección se moverá la burbuja? ¿En qué dirección se moverá la burbuja si se retira la fuerza y el nivel se frena debido a la fricción? *b*) A veces se usan niveles de este tipo como "acelerómetros" para indicar la dirección de la aceleración. Explique el principio que interviene. [*Sugerencia:* piense en empujar una palangana con agua.]
10. **PC** Como extensión del ejercicio 9, considere la situación de un niño que sostiene un globo inflado con helio en un automóvil cerrado que está en reposo. ¿Qué observará el niño cuando el vehículo *a*) acelere desde el reposo y luego *b*) frene hasta detenerse? (El globo no toca el techo del automóvil.)



▲ **FIGURA 4.26 Nivel de burbuja/acelerómetro** Véase el ejercicio 9.

11. **PC** Éste es un truco antiguo (▾figura 4.27): si se tira del mantel con gran rapidez, la vajilla que estaba sobre él apenas se moverá. ¿Por qué?

▼ **FIGURA 4.27 ¿Magia o física?** Véase el ejercicio 11.

*A menos que se indique de otra manera, todos los objetos están cerca de la superficie terrestre, donde $g = 9.80\ m/s^2$.

12. ● ¿Qué tiene más inercia: 20 cm^3 de agua o 10 cm^3 de aluminio y cuántas veces más? (Véase la tabla 9.2.) $m_{Al} = 1.4m_{agua}$

13. ● Una fuerza neta de 4.0 N imprime a un objeto una aceleración de 10 m/s^2. ¿Cuál será la masa del objeto?

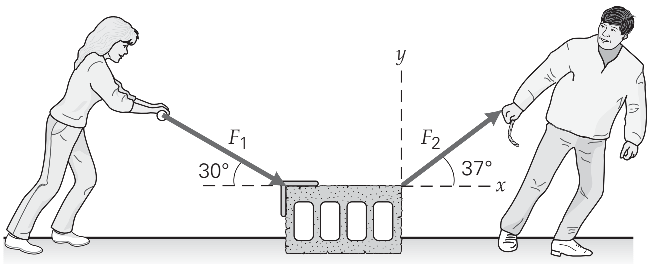
14. ● Dos fuerzas actúan sobre un objeto de 5.0 kg colocado sobre una superficie horizontal que no ejerce fricción. Una fuerza es de 30 N en la dirección $+x$, y la otra de 35 N en la dirección $-x$. ¿Cuál será la aceleración del objeto?

15. ● En el ejercicio 14, si la fuerza de 35 N actuara hacia abajo en un ángulo de 40° con respecto a la horizontal, ¿cuál sería la aceleración en este caso?

16. ● Considere una esfera de 2.0 kg y otra de 6.0 kg en caída libre. *a*) ¿Cuál es la fuerza que actúa sobre cada una? *b*) ¿Cuál es la aceleración de cada una?

17. **EI** ●● Un disco (*puck*) de hockey con un peso de 0.50 lb se desliza libremente a lo largo de una sección horizontal de hielo muy suave (que no ejerce fricción). *a*) Cuando se desliza libremente, ¿cómo se compara la fuerza hacia arriba del hielo sobre el disco (la fuerza normal) con la fuerza hacia arriba cuando el disco está permanentemente en reposo? 1) La fuerza hacia arriba es mayor cuando el disco se desliza; 2) la fuerza hacia arriba es menor cuando éste se desliza, o 3) la fuerza hacia arriba es la misma en ambas situaciones. *b*) Calcule la fuerza hacia arriba sobre el disco en ambas situaciones.

18. ●● Un bloque de 5.0 kg en reposo sobre una superficie sin fricción experimenta dos fuerzas, $F_1 = 5.5$ N y $F_2 = 3.5$ N, como se ilustra en la ▼figura 4.28. ¿Qué fuerza horizontal habría que aplicar también para mantener el bloque en reposo?



▲ **FIGURA 4.28 Dos fuerzas aplicadas** Véase el ejercicio 18.

19. **EI** ●● *a*) Se le indica que un objeto tiene aceleración cero. ¿Qué de lo siguiente es verdad? 1) El objeto está en reposo; 2) el objeto se mueve con velocidad constante; 3) tanto 1) como 2) son posibles; o 4) ni 1 ni 2 son posibles. *b*) Dos fuerzas que actúan sobre el objeto son $F_1 = 3.6$ N a 74° bajo el eje $+x$ y $F_2 = 3.6$ N a 34° por arriba del eje $-x$. ¿Habrá una tercera fuerza sobre el objeto? ¿Por qué? Si la hay, ¿qué fuerza es?

20. **EI** ●● Un pez de 25 lb es capturado y jalado hacia el bote. *a*) Compare la tensión en el cordel de la caña de pescar cuando el pescado es subido verticalmente (con una rapidez constante), con la tensión cuando el pescado se sostiene verticalmente en reposo para la ceremonia de toma de fotografía en el muelle. ¿En qué caso es mayor la tensión? 1) Cuando se está subiendo al pescado; 2) cuando se le sostiene firmemente o 3) la tensión es la misma en ambas situaciones. *b*) Calcule la tensión en el cordel de la caña de pescar.

21. ●●● Un objeto de 1.5 kg se mueve hacia arriba por el eje y con una rapidez constante. Cuando llega al origen, se le aplican las fuerzas $F_1 = 5.0$ N a 37° por arriba del eje $+x$, $F_2 = 2.5$ N en la dirección $+x$, $F_3 = 3.5$ N a 45° debajo del eje $-x$ y $F_4 = 1.5$ N en la dirección $-y$. *a*) ¿El objeto continuará moviéndose por el eje *y*? *b*) Si no, ¿qué fuerza aplicada simultáneamente lo mantendrá moviéndose por el eje *y* con rapidez constante?

22. **EI** ●●● Tres fuerzas horizontales (las únicas horizontales) actúan sobre una caja colocada sobre el piso. Una de ellas (llamémosla F_1) actúa derecho hacia el este y tiene una magnitud de 150 lb. Una segunda fuerza (F_2) tiene un componente hacia el este de 30.0 lb y un componente hacia el sur de 40.0 lb. La caja permanece en reposo. (Ignore la fricción.) *a*) Diagrame las dos fuerzas conocidas sobre la caja. ¿En cuál cuadrante estará la tercera fuerza (desconocida)? 1) En el primer cuadrante; 2) en el segundo cuadrante; 3) en el tercer cuadrante o 4) en el cuarto cuadrante. *b*) Encuentre la tercera fuerza desconocida en newtons y compare su respuesta con la estimación a partir del diagrama.

4.3 Segunda ley de Newton del movimiento

23. **OM** La unidad de fuerza newton equivale a *a*) kg · m/s, *b*) kg · m/s^2, *c*) kg · m^2/s o *d*) ninguna de las anteriores.

24. **OM** La aceleración de un objeto es *a*) inversamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él, *b*) directamente proporcional a su masa, *c*) directamente proporcional a la fuerza neta e inversamente proporcional a su masa, *d*) ninguna de las anteriores.

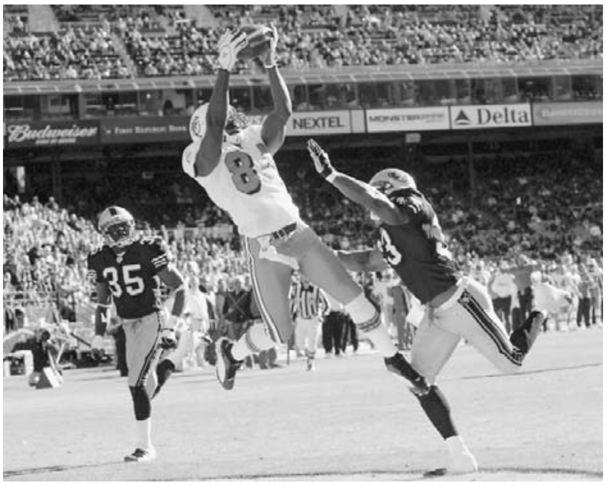
25. **OM** El peso de un objeto es directamente proporcional *a*) a su masa, *b*) a su inercia, *c*) a la aceleración de la gravedad, *d*) a todas las anteriores.

26. **PC** Un astronauta tiene una masa de 70 kg medida en la Tierra. ¿Cuánto pesará en el espacio lejano, lejos de cualquier cuerpo celestial? ¿Qué masa tendrá ahí?

27. **PC** En general, en este capítulo consideramos fuerzas aplicadas a objetos de masa constante. ¿Cómo cambiaría la situación si se agregara o quitara masa a un sistema mientras se le está aplicando una fuerza? Dé ejemplos de situaciones en que podría suceder esto.

28. **PC** Los motores de la mayoría de los cohetes producen un empuje (fuerza hacia adelante) constante. Sin embargo, cuando un cohete se lanza al espacio, su aceleración se incrementa con el tiempo mientras sigue funcionando el motor. ¿Esta situación infringe la segunda ley de Newton? Explique.

29. **PC** Los buenos receptores de fútbol americano suelen tener manos "suaves" para atrapar el balón (▶figura 4.29). ¿Cómo interpretaría esta descripción con base en la segunda ley de Newton?



▲ **FIGURA 4.29 Manos suaves** Véase el ejercicio 29.

30. ● Se aplica una fuerza neta de 6.0 N sobre una masa de 1.5 kg. ¿Cuál es la aceleración del objeto?

31. ● ¿Qué masa tiene un objeto que acelera a 3.0 m/s^2 bajo la influencia de una fuerza neta de 5.0 N?

32. ● Un jumbo jet Boeing 747 cargado tiene una masa de 2.0×10^5 kg. ¿Qué fuerza neta se requiere para imprimirle una aceleración de 3.5 m/s^2 en la pista de despegue?

33. **EI** ● Un objeto de 6.0 kg se lleva a la Luna, donde la aceleración debida a la gravedad es sólo la sexta parte que en la Tierra. *a*) La masa del objeto en la Luna es 1) cero, 2) 1.0 kg, 3) 6.0 kg o 4) 36 kg. ¿Por qué? *b*) ¿Cuánto pesa el objeto en la Luna?

34. ● ¿Cuánto pesa en newtons una persona de 150 lb? Calcule su masa en kilogramos.

35. **EI** ●● La ▼figura 4.30 muestra la etiqueta de un producto. *a*) La etiqueta es correcta 1) en la Tierra; 2) en la Luna, donde la aceleración debida a la gravedad es apenas la sexta parte que en la Tierra; 3) en el espacio lejano, donde casi no hay gravedad o 4) en todos los lugares anteriores. *b*) ¿Qué masa de lasaña indicaría una etiqueta para una cantidad que pesa 2 lb en la Luna?

36. ●● En una competencia universitaria, 18 estudiantes levantan un auto deportivo. Mientras lo sostienen, cada estudiante ejerce una fuerza hacia arriba de 400 N. *a*) ¿Qué masa tiene el automóvil en kilogramos? *b*) ¿Cuánto pesa en libras?

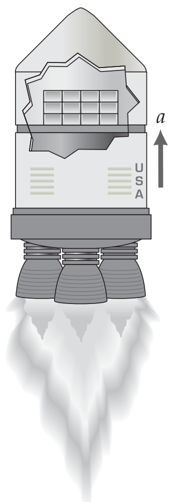
37. ●● *a*) Una fuerza horizontal actúa sobre un objeto en una superficie horizontal sin fricción. Si la fuerza se reduce a la mitad y la masa del objeto se aumenta al doble, la aceleración será 1) cuatro veces, 2) dos veces, 3) la mitad o 4) la cuarta parte de la que tenía antes. *b*) Si la aceleración del objeto es de 1.0 m/s^2 y la fuerza aplicada se aumenta al doble mientras la masa se reduce a la mitad, ¿qué aceleración tendrá entonces?

38. ●● El motor de un avión de juguete de 1.0 kg ejerce una fuerza de 15 N hacia adelante. Si el aire ejerce una fuerza de resistencia de 8.0 N sobre el avión, ¿qué magnitud tendrá la aceleración del avión?

39. ●● Cuando se aplica una fuerza horizontal de 300 N a una caja de 75.0 kg, ésta se desliza por un piso plano, oponiéndose a una fuerza de fricción cinética de 120 N. ¿Qué magnitud tiene la aceleración de la caja?

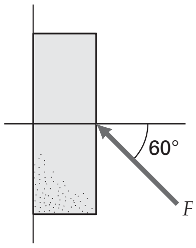
40. **EI** ●● Un cohete está alejado de todos los planetas y de las estrellas, de manera que la gravedad no está en consideración. El cohete utiliza sus motores para acelerar hacia arriba con un valor de $a = 9.80\ m/s^2$. Sobre el piso de la cabina central hay un cajón (un objeto con forma de ladrillo), cuya masa es de 75.0 kg (▼figura 4.31). *a*) ¿Cuántas fuerzas actúan sobre el cajón? 1) cero; 2) una; 3) dos; 4) tres. *b*) Determine la fuerza normal sobre el cajón y compárela con la fuerza normal que éste experimentaría si estuviera en reposo sobre la superficie terrestre.

▲ **FIGURA 4.30 ¿Etiqueta correcta?** Véase ejercicio 35.



▲ **FIGURA 4.31 ¡Vámonos!** Véase el ejercicio 40.

41. ●● Un objeto, cuya masa es de 10.0 kg, se desliza *hacia arriba* por un muro vertical resbaladizo. Una fuerza F de 60 N actúa sobre el objeto con un ángulo de 60°, como se muestra en la ▼figura 4.32. *a*) Determine la fuerza normal ejercida sobre el objeto por el muro. *b*) Determine la aceleración del objeto.



▲ **FIGURA 4.32 Hacia arriba por el muro** Véase el ejercicio 41.

42. ●● En un frenado de emergencia para evitar un accidente, un cinturón de seguridad con correa al hombro sostiene firmemente a un pasajero de 60 kg. Si el automóvil viajaba inicialmente a 90 km/h y se detuvo en 5.5 s en un camino recto y plano, ¿qué fuerza media aplicó el cinturón al pasajero?

43. ●● Una catapulta de portaaviones acelera un avión de 2000 kg uniformemente, desde el reposo hasta una rapidez de lanzamiento de 320 km/h, en 2.0 s. ¿Qué magnitud tiene la fuerza neta aplicada al avión?

44. ●●● En su servicio, un tenista acelera una pelota de 56 g horizontalmente, desde el reposo hasta una rapidez de 35 m/s. Suponiendo que la aceleración es uniforme a lo largo de una distancia de aplicación de la raqueta de 0.50 m, ¿qué magnitud tiene la fuerza que la raqueta ejerce sobre la pelota?

45. ●●● Un automóvil se patina y está fuera de control sobre una carretera horizontal cubierta de nieve (que no ejerce fricción). Su masa es de 2000 kg y va directamente hacia Louise Lane con una rapidez de 45.0 m/s. Cuando el automóvil se encuentra a 200 m de ella, Superman comienza a ejercer una fuerza constante F sobre el auto relativa a la horizontal con una magnitud de 1.30×10^4 N (es un tipo fuerte) a un ángulo de 30° hacia abajo. ¿Superman estaba en lo correcto? ¿Esa fuerza era suficiente para detener el automóvil antes de que golpeara a Louise?

4.4 Tercera ley de Newton del movimiento

46. **OM** Las fuerzas de acción y reacción de la tercera ley de Newton *a*) están en la misma dirección, *b*) tienen diferentes magnitudes, *c*) actúan sobre diferentes objetos o *d*) pueden ser la misma fuerza.

47. **OM** Un tabique golpea una ventana de vidrio y la rompe. Entonces, *a*) la magnitud de la fuerza que el tabique ejerce sobre el vidrio es mayor que la magnitud de la fuerza que el vidrio ejerce sobre el tabique, *b*) la magnitud de la fuerza del tabique contra el vidrio es menor que la del vidrio contra el tabique, *c*) la magnitud de la fuerza del tabique contra el vidrio es igual a la del vidrio contra el tabique o *d*) nada de lo anterior.

48. **OM** Un camión de carga choca de frente contra un automóvil, el cual sufre daños mucho mayores que el camión. Esto nos permite afirmar que *a*) la magnitud de la fuerza que el camión ejerce sobre el auto es mayor que la magnitud de la fuerza que el auto ejerce sobre el camión, *b*) la magnitud de la fuerza del camión contra el auto es menor que la del auto contra el camión, *c*) la magnitud de la fuerza del camión contra el auto es igual a la del automóvil contra el camión o *d*) nada de lo anterior.

49. **PC** Veamos la situación que viven de un granjero y un caballo. Cierto día, un granjero engancha una carreta pesada a su caballo y le exige tirar de ella. El caballo le dice: "Bueno. No puedo tirar de la carreta porque, según la tercera ley de Newton, si aplico una fuerza a la carreta, ella aplicará una fuerza igual y opuesta sobre mí. El resultado neto es que las fuerzas se cancelarán y no podré mover la carreta. Por lo tanto, es imposible que tire de la carreta." ¡El granjero está furioso! ¿Qué puede decir para convencer al caballo de que se mueva?

50. **PC** ¿Hay un error en estas afirmaciones? Cuando se golpea una pelota de béisbol con un bate, hay fuerzas iguales y opuestas sobre el bate y sobre la pelota. Las fuerzas se cancelan y no hay movimiento.

51. **EI** ● Un libro descansa sobre una superficie horizontal. *a*) Hay 1) una, 2) dos o 3) tres fuerza(s) que actúa(n) sobre el libro. *b*) Identifique la fuerza de reacción a cada fuerza sobre el libro.

52. ●● En un evento olímpico de patinaje de figura, un patinador de 65 kg empuja a su compañera de 45 kg, haciendo que ella acelere a una tasa de 2.0 m/s^2. ¿A qué tasa acelerará el patinador? ¿Cuál es la dirección de su aceleración?

53. **EI** ●● Un velocista cuya masa es de 65.0 kg inicia su carrera empujando horizontalmente hacia atrás sobre los tacos de salida con una fuerza de 200 N. *a*) ¿Qué fuerza provoca que acelere desde los bloques? 1) Su empuje sobre los bloques; 2) la fuerza hacia abajo que ejerce la gravedad, o 3) la fuerza que los tacos ejercen hacia delante sobre él. *b*) Determine su aceleración inicial cuando pierde contacto con los tacos de salida.

54. ●● Jane y Juan, cuyas masas son de 50 y 60 kg, respectivamente, están parados en una superficie sin fricción a 10 m de distancia entre sí. Juan tira de una cuerda que lo une a Jane, y le imprime a ella una aceleración de 0.92 m/s^2 hacia él. *a*) ¿Qué aceleración experimenta Juan? *b*) Si la fuerza se aplica de forma constante, ¿dónde se juntarán Juan y Jane?

55. **EI** ●●● Durante un arriesgada acción, el equipo de rescate de un helicóptero acelera inicialmente a una pequeña niña (cuya masa es de 25.0 kg) verticalmente desde la azotea de un edificio en llamas. Hacen esto luego de arrojar una cuerda hacia la niña, quien debe asirse de ella mientras la levantan. Ignore la masa de la cuerda. *a*) ¿Qué fuerza provoca que la niña acelere verticalmente hacia arriba? 1) Su peso; 2) el tirón del helicóptero sobre la cuerda; 3) el tirón de la niña sobre la cuerda, o 4) el tirón de la cuerda sobre la niña. *b*) Determine el tirón de la cuerda (es decir, la tensión) si el valor de la aceleración inicial de la niña es $a_y = +0.750\ m/s^2$.

4.5 Más acerca de las leyes de Newton: diagramas de cuerpo libre y equilibrio traslacional

56. **OM** Las ecuaciones de cinemática del capítulo 2 pueden utilizarse *a*) sólo con fuerzas constantes, *b*) sólo con velocidades constantes, *c*) con aceleraciones variables, *d*) todas las opciones anteriores son verdaderas.

57. **OM** La condición (o condiciones) para el equilibrio de traslación es (o son): *a*) $\sum F_x = 0$, *b*) $\sum F_y = 0$, *c*) $\sum \vec{\mathbf{F}}_i = 0$, *d*) todas las anteriores.

58. **PC** Dibuje un diagrama de cuerpo libre de una persona que va en el asiento de un avión *a*) que acelera sobre la pista para despegar y *b*) después de despegar a un ángulo de 20° respecto al suelo.

59. **PC** Una persona empuja perpendicularmente sobre un bloque de madera que se colocó contra un muro. Dibuje un diagrama de cuerpo libre e identifique las fuerzas de reacción a todas las fuerzas sobre el bloque.

60. **PC** Una persona se pone de pie sobre una báscula de baño (que no es del tipo digital) con los brazos a los costados. Entonces, rápidamente alza los brazos sobre su cabeza, y nota que la lectura de la báscula se incrementa conforme los sube. De manera similar, hay un decremento en la lectura conforme baja sus brazos a la posición inicial. ¿Por qué se altera la lectura de la báscula? (Trate de hacerlo usted mismo.)

61. **EI** ● *a*) Cuando un objeto está en un plano inclinado, la fuerza normal que el plano ejerce sobre el objeto es 1) menor que, 2) igual a o 3) mayor que el peso del objeto. ¿Por qué? *b*) Para un objeto de 10 kg en un plano inclinado de 30°, calcule el peso del objeto y la fuerza normal que el plano ejerce sobre él.

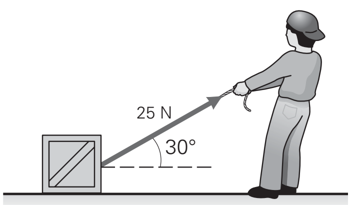
62. ●● Una persona de 75.0 kg está parada sobre una báscula dentro de un elevador. ¿Qué marca la escala en newtons si el elevador *a*) está en reposo, *b*) sube con velocidad constante de 2.00 m/s y *c*) acelera hacia arriba a 2.0 m/s^2?

63. ●● En el ejercicio 62, ¿qué pasa si el elevador acelera hacia abajo a 2.00 m/s^2?

64. **EI** ●● El peso de un objeto de 500 kg es de 4900 N. *a*) Cuando el objeto está en un elevador en movimiento, su peso medido podría ser 1) cero, 2) entre cero y 4900 N, 3) más de 4900 N o 4) todo lo anterior. ¿Por qué? *b*) Describa el movimiento si el peso medido del objeto es de tan sólo 4000 N en un elevador en movimiento.

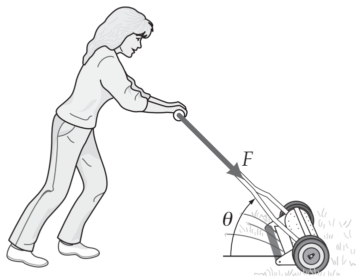
65. ●● *a*) Un esquiador acuático de 75 kg es jalado por un bote con una fuerza horizontal de 400 N derecho hacia el este, con una resistencia del agua sobre los esquíes de 300 N. Una súbita ráfaga de viento ejerce otra fuerza horizontal de 50 N sobre el esquiador a un ángulo de 60° al norte del este. En ese instante, ¿cuál es la aceleración del esquiador? *b*) ¿Cuál sería la aceleración del esquiador si la fuerza del viento fuera en dirección contraria a la que se indica en el inciso *a*?

66. ●● Un niño tira de una caja de 30 kg de masa con una fuerza de 25 N en la dirección que se muestra en la ▼figura 4.33. *a*) Sin considerar la fricción, ¿qué aceleración tiene la caja? *b*) ¿Qué fuerza normal ejerce el suelo sobre la caja?



▲ **FIGURA 4.33 Tirar de una caja** Véase el ejercicio 66.

67. ●● Una joven empuja una podadora de pasto de 25 kg como se muestra en la ▼figura 4.34. Si $F = 30$ N y $\theta = 37°$, *a*) ¿qué aceleración tiene la podadora y *b*) qué fuerza normal ejerce el césped sobre la podadora? No tome en cuenta la fricción.



▲ **FIGURA 4.34 Corte del césped** Véase el ejercicio 67.

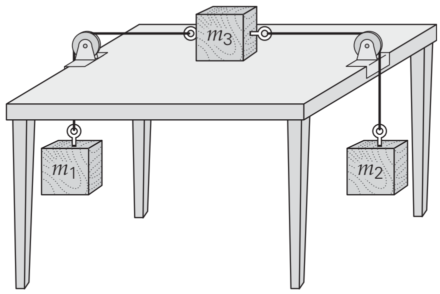
68. ●● Un camión de 3000 kg remolca un automóvil de 1500 kg con una cadena. Si la fuerza neta hacia adelante que el suelo ejerce sobre el camión es de 3200 N, *a*) ¿qué aceleración tiene el coche? *b*) ¿Qué tensión hay en la cadena?

69. ●● Un bloque cuya masa es de 25.0 kg se desliza hacia abajo sobre una superficie inclinada a 30° que no ejerce fricción. Para asegurarse de que el bloque no acelere, ¿cuál es la fuerza mínima que se debe ejercer sobre él y en qué dirección?

70. **EI** ●● *a*) Un esquiador olímpico baja sin empujarse por una pendiente de 37°. Sin tomar en cuenta la fricción, actúa(n) 1) una, 2) dos o 3) tres fuerza(s) sobre el esquiador. *b*) ¿Qué aceleración tiene el esquiador? *c*) Si el esquiador tiene una rapidez de 5.0 m/s en la parte más alta de la pendiente de 35 m de longitud, ¿qué rapidez tiene al llegar a la base?

71. ●● Un coche sube por impulso (con el motor apagado) por una pendiente de 30°. Si en la base de la pendiente su rapidez era de 25 m/s, ¿qué distancia recorrerá antes de detenerse?

72. ●● Suponga condiciones ideales sin fricción para el dispositivo que se ilustra en la ▼figura 4.35. ¿Qué aceleración tiene el sistema si *a*) $m_1 = 0.25$ kg, $m_2 = 0.50$ kg y $m_3 = 0.25$ kg; y *b*) $m_1 = 0.35$ kg, $m_2 = 0.15$ kg y $m_3 = 0.50$ kg?



▲ **FIGURA 4.35 ¿Hacia adónde acelerarán?** Véanse los ejercicios 72, 110 y 111.

73. **EI ●●** Se ata una cuerda por ambos extremos a dos árboles, y se cuelga una bolsa en su parte media, de manera que la cuerda se comba verticalmente. *a*) La tensión sobre la cuerda depende 1) únicamente de la separación de los árboles, 2) únicamente del combado, 3) tanto de la separación como del combado, o 4) ni de la separación ni del combado. *b*) Si la distancia entre los árboles es de 10 m, la masa de la bolsa es de 5.0 kg y el combado es de 0.20 m, ¿qué tensión habrá en la cuerda?

74. **●●** Un gimnasta de 55 kg pende verticalmente de un par de anillos paralelos. *a*) Si las cuerdas que sostienen los anillos están sujetas al techo directamente arriba, ¿qué tensión habrá en cada cuerda? *b*) Si las cuerdas están sujetas de manera que forman un ángulo de 45° con el techo, ¿qué tensión habrá en cada cuerda?

75. **●●** El automóvil de un físico tiene un pequeño plomo suspendido de una cuerda sujeta al toldo. Partiendo del reposo, después de una fracción de segundo, el vehículo acelera a una tasa constante durante 10 s. En este tiempo, la cuerda (con el peso en su extremo) forma un ángulo hacia atrás (opuesto a la aceleración) de 15.0° con respecto a la vertical. Determine la aceleración del automóvil (y la del peso) durante el intervalo de 10 s.

76. **●●** Un niño ata con un cordel una masa (m) de 50.0 g a un carrito de juguete (masa $M = 350$ g). El cordel se hace pasar por encima del borde de una mesa mediante una polea sin fricción (ignore su masa y la del cordel) de manera que el cordel quede horizontal. Suponiendo que el carrito tiene ruedas cuya fricción se ignora, calcule *a*) la aceleración del carrito y *b*) la tensión en el cordel.

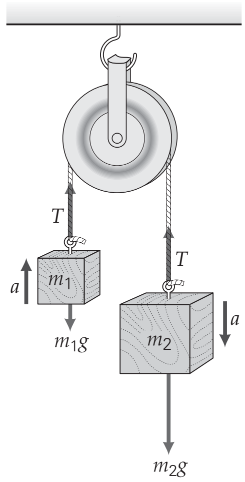
77. **●●** En los aeropuertos al final de la mayoría de las pistas de aterrizaje, se construye una extensión de la pista utilizando una sustancia especial llamada *formcreto*. Este material puede resistir el peso de automóviles, pero se desmorona bajo el peso de los aviones, para frenarlos si aún van rápido al final de la pista. Si un avión de masa 2.00×10^5 kg debe detenerse desde una rapidez de 25.0 m/s sobre un trecho de 100 m de largo de formcreto, ¿cuál será la fuerza promedio que ejerce el formcreto sobre el avión?

78. **●●** Un rifle pesa 50.0 N y su cañón mide 0.750 de largo. Con él se dispara una bala de 25.0 g, que sale por el cañón con una rapidez de 300 m/s, después de haber sido acelerada de manera uniforme. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza que la bala ejerce sobre el rifle?

79. **●●** Una fuerza horizontal de 40 N, que actúa sobre un bloque en una superficie a nivel que no ejerce fricción, produce una aceleración de 2.5 m/s^2. Un segundo bloque, con una masa de 4.0 kg, se deja caer sobre el primero. ¿Cuál es la magnitud de la aceleración de la combinación de bloques si la misma fuerza continúa actuando? (Suponga que el segundo bloque no se desliza sobre el primero.)

80. **●●** La *máquina Atwood* consiste en dos masas suspendidas de una polea fija, como se muestra en la ▸figura 4.36. Se le llama así por el científico británico George Atwood (1746-1807), quien la usó para estudiar el movimiento y medir el valor de g. Si $m_1 = 0.55$ kg y $m_2 = 0.80$ kg, *a*) ¿qué aceleración tiene el sistema y *b*) qué magnitud tiene la tensión en el cordel?

81. **●●** Una máquina de Atwood (figura 4.36) tiene masas suspendidas de 0.25 y 0.20 kg. En condiciones ideales, ¿qué aceleración tendrá la masa más pequeña?

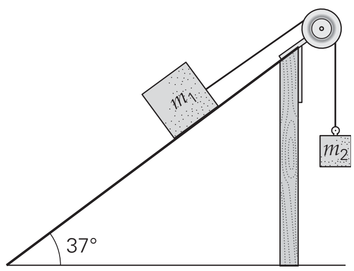


▲ **FIGURA 4.36 Máquina de Atwood** Véanse los ejercicios 80, 81 y 82.

82. **●●●** Una masa, $m_1 = 0.215$ kg, de una máquina de Atwood ideal (figura 4.36) descansa en el piso 1.10 m más abajo que la otra masa, $m_2 = 0.255$ kg. *a*) Si las masas se sueltan del reposo, ¿cuánto tardará m_2 en llegar al piso? *b*) ¿A qué altura sobre el piso ascenderá m_1? [*Sugerencia:* cuando m_2 choca contra el piso, m_1 sigue moviéndose hacia arriba.]

83. **EI ●●●** Dos bloques están conectados mediante un cordel ligero y son acelerados hacia arriba por una fuerza F. La masa del bloque superior es de 50.0 kg; y la del bloque inferior, de 100 kg. La aceleración hacia arriba del sistema completo es de 1.50 m/s^2. Ignore la masa del cordel. *a*) Dibuje el diagrama de cuerpo libre para cada bloque. Utilice los diagramas para determinar cuál de las siguientes expresiones es verdadera para la magnitud de la tensión T del cordel en comparación con otras fuerzas: 1) $T > w_2$ y $T < F$; 2) $T > w_2$ y $T > F$; 3) $T < w_2$ y $T < F$, o 4) $T = w_2$ y $T < F$. *b*) Aplique las leyes de Newton para determinar el tirón F que se requiere. *c*) Calcule la tensión T en el cordel.

84. **●●●** En el dispositivo ideal sin fricción que se muestra en la ▾figura 4.37, $m_1 = 2.0$ kg. Calcule m_2 si ambas masas están en reposo. ¿Y si ambas masas se mueven con velocidad constante?



▲ **FIGURA 4.37 Máquina de Atwood inclinada** Véanse los ejercicios 84, 85 y 112.

85. ●●● En el dispositivo ideal de la figura 4.37, $m_1 = 3.0$ kg y $m_2 = 2.5$ kg. *a*) ¿Qué aceleración tienen las masas? *b*) ¿Qué tensión hay en el cordel?

86. ●●● Dos bloques están en contacto sobre una tabla nivelada y sin fricción. La masa del bloque izquierdo es de 5.00 kg y la masa del bloque derecho es de 10.0 kg; ambos aceleran hacia la izquierda a 1.50 m/s^2. Una persona a la izquierda ejerce una fuerza (F_1) de 75.0 N hacia la derecha. Otra persona ejerce una fuerza desconocida (F_2) hacia la izquierda. *a*) Determine la fuerza F_2. *b*) Calcule la fuerza de contacto N entre los dos bloques (esto es, la fuerza normal en sus superficies verticales en contacto).

4.6 Fricción

87. **OM** En general, la fuerza de fricción *a*) es mayor para superficies lisas que para las ásperas, *b*) depende de la rapidez de deslizamiento, *c*) es proporcional a la fuerza normal o *d)* depende mucho del área de contacto.

88. **OM** El coeficiente de fricción cinética, μ_k: *a*) suele ser mayor que el de fricción estática, μ_s; *b*) suele ser igual a μ_s; *c*) suele ser menor que μ_s, o *d*) es igual a la fuerza aplicada que excede la fuerza estática máxima.

89. **OM** Un cajón está a la mitad de la plataforma de un camión. El conductor acelera el camión gradualmente desde el reposo hasta una rapidez normal, pero luego tiene que detenerse súbitamente para evitar chocar contra un automóvil. Si el cajón se desliza conforme el camión se detiene, la fuerza de fricción *a*) estaría en la dirección hacia delante, *b*) estaría en la dirección hacia atrás, *c*) sería cero.

90. **PC** Identifique la dirección de la fuerza de fricción en los siguientes casos: *a*) un libro que descansa en una mesa; *b*) una caja que resbala por una superficie horizontal; *c*) un coche que da vuelta en un camino plano; *d*) el movimiento inicial de una pieza transportada por una banda sin fin de una línea de ensamble.

91. **PC** El propósito de los frenos antibloqueo de un automóvil es evitar que las ruedas se bloqueen; entonces, el coche seguirá rodando en vez de deslizarse. ¿Por qué el rodamiento habría de reducir la distancia de detención, en comparación con el deslizamiento?

92. **PC** La ▾figura 4.38 muestra las alas delantera y trasera de un automóvil de carreras Indy. Estas alas generan una fuerza de abatimiento: la fuerza vertical que el aire ejerce hacia abajo cuando se mueve sobre el vehículo. ¿Por qué es deseable tal fuerza? Un carro Indy puede generar una fuerza de abatimiento igual al doble de su peso. ¿Y por qué no simplemente hacer más pesados los coches?

▲ **FIGURA 4.38 Fuerza de abatimiento** Véase el ejercicio 92.

93. **PC** *a*) Solemos decir que la fricción se opone al movimiento. Sin embargo, cuando caminamos, la fuerza de fricción es en la dirección de nuestro movimiento (figura 4.17). ¿Hay alguna inconsistencia en términos de la segunda ley de Newton? Explique. *b*) ¿Qué efectos tendría el viento sobre la resistencia del aire? [*Sugerencia:* el viento puede soplar en diferentes direcciones.]

94. **PC** ¿Por qué los neumáticos para arrancones son anchos y lisos, en tanto que los neumáticos de automóviles para pasajeros son más angostos y tienen surcos (▾figura 4.39)? ¿Se debe a consideraciones de fricción o de seguridad? ¿Esta diferencia contradice el hecho de que la fricción es independiente del área superficial?

▲ **FIGURA 4.39 Neumáticos para autos de carrera y de pasajeros: seguridad** Véase el ejercicio 94.

95. **EI** ● Una caja de 20 kg descansa en una superficie horizontal áspera. Si se le aplica una fuerza horizontal de 120 N, la caja acelera a 1.0 m/s^2. *a*) Si se dobla la fuerza aplicada, la aceleración 1) aumentará, pero a menos del doble; 2) también aumentará al doble; o 3) aumentará a más del doble. ¿Por qué? *b*) Calcule la aceleración para demostrar su respuesta al inciso *a*.

96. ● Al mover un escritorio de 35.0 kg de un lado de un salón al otro, un profesor descubre que se requiere una fuerza horizontal de 275 N para poner el escritorio en movimiento, y una de 195 N para mantenerlo en movimiento con rapidez constante. Calcule los coeficientes de fricción *a*) estática y *b*) cinética entre el escritorio y el piso.

97. ● Una caja de 40 kg está en reposo en una superficie horizontal. Si el coeficiente de fricción estática entre la caja y la superficie es de 0.69, ¿qué fuerza horizontal se requiere para moverla?

98. ● Los coeficientes de fricción estática y cinética entre una caja de 50 kg y una superficie horizontal son 0.500 y 0.400, respectivamente. *a*) ¿Qué aceleración tiene la caja si se le aplica una fuerza horizontal de 250 N? *b*) ¿Y si se aplican 235 N?

99. ●● Una caja de embalaje se coloca en un plano inclinado de 20°. Si el coeficiente de fricción estática entre la caja y el plano es de 0.65, ¿la caja se deslizará hacia abajo por el plano si se suelta desde el reposo? Justifique su respuesta.

100. ●● Un automóvil de 1500 kg viaja a 90 km/h por una carretera recta de concreto. Ante una situación de emergencia, el conductor pone los frenos y el automóvil derrapa hasta detenerse. ¿En qué distancia se detendrá en *a*) pavimento seco y *b*) pavimento mojado, respectivamente?

101. ●● Un jugador de hockey golpea un disco (*puck*) con su bastón y le imparte una rapidez inicial de 5.0 m/s. Si el *puck* desacelera uniformemente y se detiene en una distancia de 20 m, ¿qué coeficiente de fricción cinética habrá entre el hielo y el disco?

102. ●● En su intento por mover un pesado sillón (cuya masa es de 200 kg) por un piso alfombrado, un hombre determina que debe ejercer una fuerza horizontal de 700 N para lograr que el sillón apenas se mueva. Una vez que el sillón comienza a moverse, el hombre continúa empujando con una fuerza de 700 N, y su hija (una especialista en física) estima que entonces acelera a 1.10 m/s^2. Determine *a*) el coeficiente de fricción estática y *b*) el coeficiente de fricción cinética entre el sillón y la alfombra.

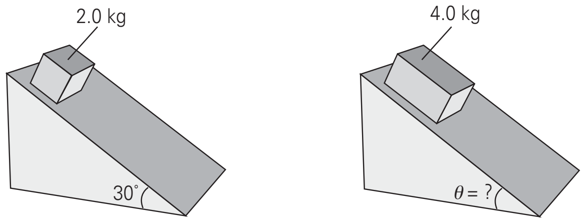
103. **EI** ●● Al tratar de empujar un cajón por una superficie horizontal de concreto, una persona tiene que elegir entre empujarlo hacia abajo con un ángulo de 30° o tirar de él hacia arriba con un ángulo de 30°. *a*) ¿Cuál de las siguientes opciones es más probable que requiera de menos fuerza por parte de la persona? 1) Empujar con un ángulo hacia abajo; 2) tirar con el mismo ángulo, pero hacia arriba, o 3) empujar el cajón o tirar de él es algo que no importa. *b*) Si el cajón tiene una masa de 50.0 kg y el coeficiente de fricción cinética entre éste y el concreto es 0.750, calcule la fuerza requerida para moverlo a través del concreto con una rapidez constante para ambas situaciones.

104. ●● Suponga que las condiciones de la pendiente para el esquiador de la ▼figura 4.40 son tales que el esquiador viaja a velocidad constante. ¿Con base en la fotografía podría usted calcular el coeficiente de fricción cinética entre la superficie nevada y los esquíes? Si la respuesta es sí, describa cómo lo haría.

▲ **FIGURA 4.40 Un descenso** Véase el ejercicio 104.

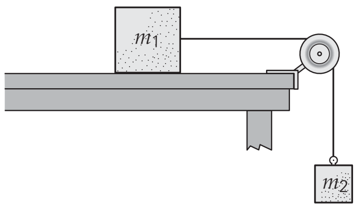
105. ●● Un bloque de madera de 5.0 kg se coloca en un plano inclinado de madera ajustable. *a*) ¿Más allá de qué ángulo de inclinación el bloque comenzará a *resbalar* por el plano? *b*) ¿A qué ángulo habría que ajustar entonces el plano para que el bloque se siguiera deslizando con rapidez constante?

106. ●● Un bloque cúbico con una masa de 2.0 kg y 10 cm por lado comienza apenas a deslizarse por un plano inclinado de 30° (▼figura 4.41). Otro bloque de la misma altura y el mismo material tiene una base de 20 × 10 cm y, por lo tanto, una masa de 4.0 kg. *a*) ¿Con qué ángulo crítico comenzará a deslizarse el bloque más masivo? ¿Por qué? *b*) Estime el coeficiente de fricción estática entre el bloque y el plano.



▲ **FIGURA 4.41 ¿Con qué ángulo comenzará a deslizarse?** Véase el ejercicio 106.

107. ●● En el aparato de la ▼figura 4.42, $m_1 = 10$ kg y los coeficientes de fricción estática y cinética entre m_1 y la tabla son 0.60 y 0.40, respectivamente. *a*) ¿Qué masa de m_2 pondrá al sistema en movimiento? *b*) Una vez que el sistema se empiece a mover, ¿qué aceleración tendrá?



▲ **FIGURA 4.42 Fricción y movimiento** Véase el ejercicio 107.

108. ●● Al cargar un camión de reparto de pescado, una persona empuja un bloque de hielo hacia arriba sobre un plano inclinado a 20° con rapidez constante. La fuerza de empuje tiene una magnitud de 150 N y es paralela al plano inclinado. El bloque tiene una masa de 35.0 kg. *a*) ¿El plano no ejerce fricción? *b*) Si el plano sí ejerce fricción, ¿cuál será la fuerza de fricción cinética sobre el bloque de hielo?

109. ●●● Un objeto, cuya masa es de 3.0 kg, se desliza *hacia arriba* por un muro vertical a *velocidad constante*, cuando una fuerza F de 60 N actúa sobre él a un ángulo de 60° con respecto a la horizontal. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el objeto. *b*) Con base en las leyes de Newton, determine la fuerza normal sobre el objeto. *c*) Determine la fuerza de fricción cinética sobre el objeto.

110. ●●● Para el dispositivo de la figura 4.35, ¿qué valor mínimo del coeficiente de fricción estática entre el bloque (m_3) y la mesa mantendría el sistema en reposo si $m_1 = 0.25$ kg, $m_2 = 0.50$ kg y $m_3 = 0.75$ kg?

111. ●●● Si el coeficiente de fricción cinética entre el bloque y la mesa de la figura 4.35 es de 0.560, y $m_1 = 0.150$ kg y $m_2 = 0.250$ kg, *a*) ¿qué valor de m_3 mantendría al sistema en movimiento con rapidez constante? *b*) Si $m_3 = 0.100$ kg, ¿qué magnitud tendría la aceleración del sistema?

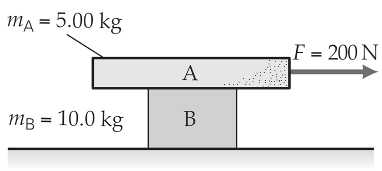
112. ●●● En el dispositivo de la figura 4.37, $m_1 = 2.0$ kg y los coeficientes de fricción estática y cinética entre m_1 y el plano inclinado son 0.30 y 0.20, respectivamente. *a*) ¿Qué valor tiene m_2 si ambas masas están en reposo? *b*) ¿Y si se mueven con velocidad constante?

Ejercicios adicionales

113. **EI** Un bloque (A, cuya masa es de 2.00 kg) está en reposo encima de otro (B, cuya masa es de 5.00 kg) sobre una superficie horizontal. La superficie es una banda eléctrica que acelera hacia la derecha a 2.50 m/s^2. B no se desliza sobre la superficie de la banda, ni A se desliza sobre la superficie de B. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para cada bloque. Utilice estos diagramas para determinar la fuerza responsable de la aceleración de A. Indique cuál de las siguientes opciones constituye esa fuerza: 1) el tirón de la banda, 2) la fuerza normal sobre A que ejerce la superficie de B, 3) la fuerza de fricción estática en la base de B o 4) la fuerza de la fricción estática que actúa sobre A y que se debe a la superficie de B. *b*) Determine las fuerzas de fricción estática en cada bloque.

114. Al mover una caja cuya masa es de 75.0 kg hacia abajo, por una rampa resbaladiza (pero que ejerce cierta fricción) y con una inclinación de 20°, un trabajador se da cuenta de que debe ejercer una fuerza horizontal de 200 N para impedir que la caja acelere por la rampa. *a*) Determine la fuerza normal N sobre la caja. *b*) Determine el coeficiente de fricción cinética entre la caja y la rampa móvil.

115. Dos bloques (A y B) se mantienen unidos mientras una fuerza $F = 200$ N los jala hacia la derecha (▼figura 4.43). B está sobre la cubierta áspera y horizontal de una mesa (con coeficiente de fricción cinética de 0.800). *a*) ¿Cuál será la aceleración del sistema? *b*) ¿Cuál será la fuerza de fricción entre los dos objetos?

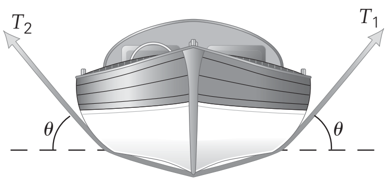


▲ **FIGURA 4.43 Arrastre de dos bloques** Véase el ejercicio 115.

116. Un cohete de juguete de dos secciones se lanza verticalmente desde el reposo. Mientras las dos secciones están juntas, los motores del cohete que se encuentran en la sección inferior ejercen una fuerza hacia arriba de 500 N. La sección superior (cono de nariz) tiene una masa (m) de 2.00 kg y la sección inferior tiene una masa (M) de 8.00 kg. *a*) Dibuje el diagrama de cuerpo libre para cada sección y determine si en los dos diagramas hay fuerzas que constituyen un par de acción-reacción. Si es así, indique cuáles son. (Podría haber más de un par.) *b*) Calcule la aceleración del cohete. *c*) Determine la fuerza de contacto entre las dos secciones (es decir, la fuerza normal hacia arriba que ejerce la sección inferior sobre la sección superior).

117. Un bloque (M) de 5.00 kg sobre un plano con 30° de inclinación está conectado con una cuerda ligera, mediante una polea que no ejerce fricción, a una masa desconocida, m. El coeficiente de fricción cinética entre el bloque y el plano inclinado es 0.100. Cuando el sistema se libera desde el reposo, la masa m acelera hacia arriba a 2.00 m/s^2. Determine *a*) la tensión de la cuerda y *b*) el valor de m.

118. **EI** Al sacar un bote del agua para guardarlo durante el invierno, la instalación de almacenamiento utiliza una correa ancha formada de cables que operan en el mismo ángulo (medidos con respecto a la horizontal) en ambos lados del bote (▼figura 4.44). *a*) Conforme el bote sube verticalmente y θ decrece, la tensión en los cables 1) aumenta, 2) disminuye, 3) permanece igual. *b*) Determine la tensión en cada cable, si el bote tiene una masa de 500 kg, el ángulo de cada cable es de 45° con respecto a la horizontal y el bote se sostiene momentáneamente en reposo. Compare este resultado con la tensión cuando el bote se eleva y se sostiene en reposo de manera que el ángulo sea de 30°.



▲ **FIGURA 4.44 Alcen el bote** Véase el ejercicio 118.

Los siguientes problemas Physlet de física pueden utilizarse con este capítulo. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.13, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7