LEYES DE NEWTON

Capítulo 4

Este avión esta acelerando antes del despegue. Las leyes de Newton relacionan la aceleración de un objeto con su masa y con las fuerzas que actúan sobre él.

Si usted fuera un pasajero, ¿cómo usaría las leyes de Newton para determinar la aceleración del avión? (Véase el ejemplo 4.9.)

Ahora que ya hemos estudiado cómo se mueven los cuerpos en una, dos y tres dimensiones, nos hacemos la siguiente pregunta, "¿por qué los objetos se ponen en movimiento?" ¿Cuáles son las causas que hacen que un cuerpo en movimiento gane velocidad o cambie la dirección?

La mecánica clásica relaciona las fuerzas que se ejercen los cuerpos entre sí, y también los cambios en el movimiento de un objeto con las fuerzas que actúan sobre él. Describe los fenómenos utilizando las tres leyes del movimiento de Newton. Mientras que ya tenemos una idea intuitiva de algunas fuerzas, como las de empuje o de tracción ejercidas por nuestros músculos o por muelles o gomas elásticas, las leyes de Newton nos permiten refinar nuestra comprensión sobre las fuerzas en general.

En este capítulo, describiremos las tres leyes del movimiento de Newton y empezaremos a utilizarlas para resolver problemas que impliquen objetos en movimiento y en reposo.

Una versión moderna de las leyes de Newton es la siguiente:

Primera ley Todo cuerpo en reposo sigue en reposo *a menos que* sobre él actúe una fuerza externa. Un cuerpo en movimiento continúa moviéndose con velocidad constante *a menos que* sobre él actúe una fuerza externa.

PRIMERA LEY DE NEWTON

Segunda ley La aceleración de un cuerpo tiene la misma dirección que la fuerza externa neta que actúa sobre él. Es proporcional a la fuerza externa neta según $\mathbf{F}_{\text{neta}} = m\mathbf{a}$, donde m es la masa del cuerpo. La fuerza neta que actúa sobre un cuerpo, también llamada fuerza resultante, es el vector suma de todas las fuerzas que sobre él actúan: $\mathbf{F}_{\text{neta}} = \sum \mathbf{F}$. Así pues,

$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a} \tag{4.1}$$

SEGUNDA LEY DE NEWTON

Tercera ley Las fuerzas siempre actúan por pares iguales y opuestos. Si el cuerpo A ejerce una fuerza $\mathbf{F}_{A,B}$ sobre el cuerpo B, éste ejerce una fuerza igual, pero opuesta $\mathbf{F}_{B;A}$, sobre el cuerpo A. Así pues,

$$\mathbf{F}_{B,A} = -\mathbf{F}_{A,B} \tag{4.2}$$

TERCERA LEY DE NEWTON

4.1 Primera ley de Newton: ley de la inercia

El rozamiento se reduce grandemente mediante un colchón de aire que soporta el aerodeslizador.

Empujemos un trozo de hielo sobre una mesa: desliza y luego se para. Si la mesa está húmeda, el hielo recorre un espacio mayor antes de pararse. Si se trata de un trozo de hielo seco (dióxido de carbono congelado) sobre un colchón de vapor de dióxido de carbono, el deslizamiento es mucho mayor y el cambio de velocidad es muy pequeño. Antes de Galileo se creía que una fuerza, tal como un empuje o un tirón, era siempre necesaria para mantener un cuerpo en movimiento con velocidad constante. Galileo, y posteriormente Newton, reconocieron que si los cuerpos se detenían en su movimiento en las experiencias diarias era debido al rozamiento (o fricción). Si éste se reduce, el cambio de velocidad se reduce. Una capa de agua o un colchón de gas son especialmente efectivos para reducir el rozamiento, permitiendo que el objeto se deslice a gran distancia con un pequeño cambio en su velocidad. Si se eliminan todas las fuerzas externas que actúan sobre un cuerpo —razonaba Galileo— su velocidad no cambiará, una propiedad de la materia que él describía como su **inercia**. Esta conclusión restablecida por Newton como su primera ley, se llama también **ley de la inercia**.

Sistemas de referencia inerciales

La ley primera de Newton no distingue entre un objeto en reposo y un objeto que se mueve con velocidad constante distinta de cero. El hecho de que un objeto esté en reposo o en movimiento con velocidad constante depende del sistema de referencia en el cual se observa el objeto. Consideremos una pelota situada en la bandeja de su asiento de un avión que vuela en una trayectoria horizontal. En un sistema de coordenadas ligado al avión (es decir, en el sistema de referencia del avión) la pelota está en reposo, y permanecerá en reposo relativo al avión en tanto éste vuele con velocidad constante.

Supongamos ahora que el piloto aumenta la potencia de los motores y el avión, de forma brusca, acelera (con respecto al suelo). Usted observará que la pelota, de repente, retrocede acelerando con respecto del avión incluso cuando no actúa ninguna fuerza sobre ella.

Un sistema de referencia que acelera respecto de un sistema inercial, no es un sistema de referencia inercial. *Así la primera ley de Newton nos proporciona el criterio para determinar si un sistema de referencia es inercial.* De hecho, es útil pensar en la primera ley de Newton como un criterio que define cuando los sistemas de referencia son inerciales.

Si sobre un objeto no actúa ninguna fuerza, cualquier sistema de referencia con respecto al cual la aceleración del objeto es cero es un **sistema de referencia inercial.**

DEFINICIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA INERCIAL

Tanto el avión, cuando se mueve a velocidad constante, como el suelo, son una buena aproximación de sistemas de referencia inerciales. Cualquier sistema de referencia que se mueve a velocidad constante con respecto a un sistema de referencia inercial también es un sistema de referencia inercial.

Un sistema de referencia ligado a la superficie de la Tierra no es totalmente un sistema de referencia inercial por la pequeña aceleración de la superficie de la Tierra debida a la rotación terrestre y a la pequeña aceleración de la propia Tierra debido a su revolución alrededor del Sol. Sin embargo, como estas aceleraciones son del orden de 0,01 m/s^2 (o menos), podemos considerar que aproximadamente un sistema de referencia ligado a la superficie de la Tierra es un sistema de referencia inercial.

El concepto de sistema de referencia inercial es crucial porque las *leyes primera, segunda y tercera de Newton son únicamente válidas en sistemas de referencia inerciales.*

4.2 Fuerza, masa y segunda ley de Newton

La primera y segunda ley de Newton nos permiten definir el concepto de fuerza. Una **fuerza** es una influencia externa sobre un cuerpo que causa su aceleración respecto a un sistema de referencia inercial. (Se supone que no actúan otras fuerzas.) La dirección de la fuerza coincide con la dirección de la aceleración causada. El módulo de la fuerza es el producto de la masa del cuerpo por el módulo de su aceleración. Esta definición se muestra en la ecuación 4.1.

Se puede comparar fuerzas, por ejemplo, estirando gomas elásticas. Si estiramos la misma magnitud gomas elásticas idénticas, ejercerán fuerzas iguales.

Los objetos se resisten intrínsecamente a ser acelerados. Imaginemos que damos una patada a una pelota de fútbol o a una bola en la bolera. Ésta última se resiste mucho más a ser acelerada que la pelota de fútbol, lo cual se manifiesta inmediatamente en la diferente sensación que notan los dedos de nuestros pies al dar el golpe sobre ambos objetos. Esta propiedad intrínseca de un cuerpo es la **masa**. Es una medida de la inercia del cuerpo. La relación de dos masas se define cuantitativamente aplicando la misma fuerza y comparando sus aceleraciones. Si la fuerza F produce la aceleración a_1 cuando se aplica a un cuerpo de masa m_1 y la misma fuerza produce la aceleración a_2 cuando se aplica a un objeto de masa m_2, la relación entre las masas se define por

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2} \tag{4.3}$$

DEFINICIÓN —MASA

Esta definición está de acuerdo con nuestra idea intuitiva de masa. Si la misma fuerza se aplica a dos objetos, el objeto de más masa es el que acelera menos. Experimentalmente se deduce que la relación a_1/a_2, obtenida cuando fuerzas de idéntica magnitud actúan sobre dos objetos, es independiente del módulo, dirección o tipo de fuerza utilizada. La masa de un cuerpo es una propiedad intrínseca del mismo y, por lo tanto, no depende de la localización del cuerpo. Es decir, la masa de un cuerpo continúa siendo la misma si el cuerpo está sobre la Tierra, sobre la Luna o el espacio exterior.

Si una comparación directa muestra que $m_2/m_1 = 2$ y $m_3/m_1 = 4$, entonces m_3 será doble que m_2, cuando se comparen entre sí directamente. Por lo tanto, podemos establecer una escala de masas eligiendo un cuerpo patrón y asignándole la masa de 1 unidad. Como ya vimos en el capítulo 1, el cuerpo elegido como patrón internacional de masa es un cilindro de una aleación de platino-iridio que se conserva cuidadosamente en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Sèvres, Francia, y se asigna la masa de 1 **kilogramo**, la unidad SI de masa. La fuerza necesaria para producir una aceleración de 1 m/s^2 sobre el cuerpo patrón es por definición 1 **newton** (N). De igual forma la fuerza que produce sobre el mismo cuerpo una aceleración de 2 m/s^2 se define como 2 N, y así sucesivamente.

EJEMPLO 4.1 | Un paquete de helado

Una fuerza determinada produce una aceleración de 5 m/s^2 sobre un cuerpo patrón de masa m_1. Cuando la misma fuerza se aplica a un paquete de helado de masa m_2 le produce una aceleración de 11 m/s^2. (*a*) ¿Cuál es la masa del paquete de helado? (*b*) ¿Cuál es el módulo de la fuerza?

Planteamiento del problema Aplicar $\Sigma \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ a cada objeto y despejar la masa del paquete de helado y el módulo de la fuerza.

(a) 1. Aplicar $\Sigma \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ a cada objeto. Únicamente hay una fuerza, por lo que necesitamos simplemente considerar el módulo de las variables vectoriales.

$$F_1 = m_1 a_1 \quad \text{y} \quad F_2 = m_2 a_2$$

2. La relación de las masas está en razón inversa con la relación de las aceleraciones producidas por la misma fuerza:

$$F_1 = F_2 = F, \quad \text{por lo tanto} \quad m_1 a_1 = m_2 a_2$$

y

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{5\ \text{m/s}^2}{11\ \text{m/s}^2}$$

3. Despejar m_2 en función de m_1, que es 1 kg.

$$m_2 = \frac{5}{11} m_1 = \frac{5}{11}(1\ \text{kg}) = \boxed{0{,}45\ \text{kg}}$$

(b) El módulo de la fuerza se obtiene multiplicando la masa por la aceleración de cualquiera de los cuerpos:

$$F = m_1 a_1 = (1\ \text{kg})(5\ \text{m/s}^2) = \boxed{5\ \text{N}}$$

Ejercicio Una fuerza de 3 N produce una aceleración de 2 m/s^2 sobre un objeto de masa desconocida. (*a*) ¿Cuál es la masa del objeto? (*b*) Si la fuerza se incrementa a 4 N, ¿cuál es la aceleración? (*Respuestas* (*a*) 1,5 kg, (*b*) 2,67 m/s^2.)

Experimentalmente se encuentra que si sobre un cuerpo actúan dos o más fuerzas, la aceleración que causan es igual a la que causaría sobre el cuerpo una sola fuerza igual a la suma vectorial de las fuerzas individuales. Es decir, las fuerzas se combinan como los vectores. La segunda ley de Newton puede expresarse, por lo tanto, en la forma

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{neta}} = m\mathbf{a}$$

EJEMPLO 4.2 | Un paseo espacial

Un astronauta se ha extraviado en el espacio lejos de su cápsula espacial. Afortunadamente posee una unidad de propulsión que le proporciona una fuerza constante F durante 3 s. Al cabo de los 3 s se ha movido 2,25 m. Si su masa es 68 kg, determinar F.

La unidad propulsora (que no se muestra en la fotografía) empuja al astronauta hacia la derecha

Planteamiento del problema La fuerza que actúa sobre el astronauta es constante, de modo que la aceleración **a** también es constante. Por lo tanto, utilizaremos las ecuaciones cinemáticas del capítulo 2 para determinar **a** y con ello obtener la fuerza, a partir de $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$. Escogeremos **F** en la dirección del eje x, de modo que $\mathbf{F} = F_x\mathbf{i}$ (figura 4.1). La componente de la segunda ley de Newton a lo largo del eje x es, por lo tanto, $F_x = ma_x$.

1. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ para relacionar la fuerza neta con la masa y la aceleración: $F_x = ma_x$. $\quad F_x = ma_x$

2. Para determinar la aceleración, utilizamos la ecuación 2.15 con $v_0 = 0$: $\quad \Delta x = \ = v_0t + \frac{1}{2}a_xt^2 = \frac{1}{2}a_xt^2$

$$a_x = \frac{2\Delta x}{t^2} = \frac{2(2{,}25\text{ m})}{(3\text{ s})^2} = 0{,}500\text{ m/s}^2$$

3. Sustituir $a_x = 0{,}500$ m/s² y $m = 68$ kg para determinar la fuerza: $\quad F_x = ma_x = (68\text{ kg})(0{,}500\text{ m/s}^2) = \boxed{34{,}0\text{ N}}$

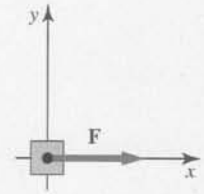


Figura 4.1

EJEMPLO 4.3 | Fuerzas que actúan sobre una partícula

¡INTÉNTELO USTED MISMO!

Una partícula de masa 0,4 kg está sometida simultáneamente a dos fuerzas $\mathbf{F}_1 = -2$ N$\mathbf{i}$ – 4 N$\mathbf{j}$ y $\mathbf{F}_2 = -2{,}6$ N$\mathbf{i}$ + 5 N$\mathbf{j}$. Si la partícula está en el origen y parte del reposo para $t = 0$, calcular (*a*) su vector posición r y (*b*) su velocidad v para $t = 1{,}6$ s.

Planteamiento del problema Como $\mathbf{F}_1$ y $\mathbf{F}_2$ son constantes, la aceleración de la partícula es constante. Por lo tanto, podemos utilizar las ecuaciones cinemáticas del capítulo 2 para determinar la posición de la partícula y la velocidad en función del tiempo.

Tape la columna de la derecha e intente resolverlo usted mismo

Pasos	Respuestas
(a) 1. Escribir la ecuación general del vector posición **r** en función del tiempo *t* para una aceleración constante **a** en función de $\mathbf{r}_0$, **v** y **a**, sustituyendo $\mathbf{r}_0 = \mathbf{v}_0 = 0$.	$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0t + \frac{1}{2}\mathbf{a}t^2 = \frac{1}{2}\mathbf{a}t^2$
2. Utilizar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ para expresar la aceleración **a** en función de la fuerza resultante $\sum \mathbf{F}$ y la masa *m*.	$\mathbf{a} = \dfrac{\sum \mathbf{F}}{m}$
3. Calcular $\sum \mathbf{F}$ a partir de las fuerzas dadas.	$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = -4{,}6\text{ N}\mathbf{i} + 1{,}0\text{ N}\mathbf{j}$
4. Determinar el vector aceleración **a**.	$\mathbf{a} = \dfrac{\sum \mathbf{F}}{m} = -11{,}5\text{ m/s}^2\ \mathbf{i} + 2{,}5\text{ m/s}^2\ \mathbf{j}$
5. Determinar el vector posición **r** para un tiempo cualquiera *t*.	$\mathbf{r} = \frac{1}{2}\mathbf{a}t^2 = \frac{1}{2}a_xt^2\mathbf{i} + \frac{1}{2}a_yt^2\mathbf{j}$ $= -5{,}75\text{ m/s}^2t^2\mathbf{i} + 1{,}25\text{ m/s}^2t^2\mathbf{j}$
6. Determinar **r** para $t = 1{,}6$ s.	$\mathbf{r} = \boxed{-14{,}7\text{ m}\mathbf{i} + 3{,}20\text{ m}\mathbf{j}}$
(b) Escribir el vector velocidad **v** en función de la aceleración y el tiempo y calcular sus componentes para $t = 1{,}6$ s.	$\mathbf{v} = \mathbf{a}t = (-11{,}5\text{ m/s}^2\mathbf{i} + 2{,}5\text{ m/s}^2\mathbf{j})t$ $= \boxed{-18{,}4\text{ m/s}\ \mathbf{i} + 4{,}00\text{ m/s}\ \mathbf{j}}$

4.3 Fuerza debida a la gravedad: el peso

Si dejamos caer un objeto cerca de la superficie terrestre, el objeto acelera hacia la Tierra. Si podemos despreciar la resistencia del aire, todos los objetos poseen la misma aceleración, llamada aceleración de la gravedad **g** en cualquier punto del espacio. La fuerza que causa esta aceleración es la fuerza de la gravedad sobre el objeto, llamada peso del mismo, **w**.[1] Si el peso **w** es la única fuerza que actúa sobre un objeto, se dice que éste se encuentra en **caída libre**. Si su masa es *m*, la segunda ley de Newton ($\Sigma\mathbf{F} = m\mathbf{a}$) define el peso del cuerpo en la forma:

[1] Referirse a la fuerza de gravedad como "el peso" es desafortunado ya que parece implicar que "el peso" es una propiedad del objeto más que de una fuerza externa que actúa sobre él. Para evitar caer en esta interpretación aparente, cada vez que leamos "el peso" mentalmente traduciremos esta denominación como "la fuerza gravitatoria que actúa".

$$\mathbf{w} = m\mathbf{g} \tag{4.4}$$

PESO

Como **g** es idéntico para todos los cuerpos, llegamos a la conclusión de que el peso de un cuerpo es proporcional a su masa. El vector **g** se denomina **campo gravitatorio** terrestre y es la fuerza por unidad de masa ejercida por la Tierra sobre cualquier objeto. Es igual a la aceleración en caída libre experimentada por un objeto.[1] Cerca de la superficie terrestre g tiene el valor

$$g = 9{,}81 \text{ N/kg} = 9{,}81 \text{ m/s}^2$$

Medidas cuidadosas muestran que **g** varía con el lugar. En particular, en un punto por encima de la superficie terrestre, **g** apunta hacia el centro de la Tierra y varía en razón inversa con el cuadrado de la distancia a dicho centro. Así pues, un cuerpo pesa ligeramente menos cuando se encuentra en lugares muy elevados respecto al nivel del mar. El campo gravitatorio también varía ligeramente con la latitud debido a que la Tierra no es exactamente esférica, sino que está achatada en los polos. **Por lo tanto, el peso, a diferencia de la masa *no* es una propiedad intrínseca del cuerpo.** Aunque el peso de un cuerpo varía de un lugar a otro debido a las variaciones de g, esta variación es demasiado pequeña para ser apreciada en la mayor parte de las aplicaciones prácticas sobre o cerca de la superficie terrestre.

Un ejemplo puede clarificar la diferencia entre masa y peso. Supongamos que en la Luna tenemos una bola pesada, como la de jugar a los bolos. Su peso es la fuerza gravitatoria que ejerce la Luna sobre ella, pero esta fuerza es sólo una sexta parte de la fuerza que se ejerce sobre la bola cuando está en la Tierra. En la Luna la bola pesa sólo una sexta parte de lo que pesa en la Tierra, por lo que para levantar la bola en ella se necesita una sexta parte de la fuerza. Sin embargo, lanzar la bola con cierta velocidad horizontal requiere la misma fuerza en la Luna que en la Tierra, o en el espacio libre.

Aunque el peso de un objeto puede variar de un lugar a otro, en cualquier lugar determinado, su peso es proporcional a su masa. Así pues, podemos comparar convenientemente las masas de dos objetos en un lugar determinado comparando sus pesos.

La sensación que tenemos de nuestro propio peso procede de las demás fuerzas que lo equilibran. Por ejemplo, al estar sentados en una silla, apreciamos la fuerza ejercida por ella que equilibra nuestro peso, y por lo tanto evita que nos caigamos al suelo. Cuando estamos situados sobre una balanza de muelles, nuestros pies aprecian la fuerza ejercida sobre nosotros por la balanza. Esta balanza está calibrada de modo que registra la fuerza que debe ejercer (por compresión de su muelle) para equilibrar nuestro peso. La fuerza que equilibra nuestro peso se denomina **peso aparente**. Este peso aparente es el que viene dado por una balanza de muelle. Si no existiese ninguna fuerza para equilibrar nuestro peso, como sucede en la caída libre, el peso aparente sería cero. Esta condición denominada **ingravidez**, es la que experimentan los astronautas en los satélites que giran alrededor de la Tierra. La única fuerza que actúa sobre el satélite es la gravedad (su peso). El astronauta está también en caída libre. La única fuerza que actúa sobre él es su peso, que produce la aceleración g. Como no existe ninguna fuerza que equilibre la fuerza de la gravedad, el peso aparente del astronauta es cero.

Unidades de fuerza y masa

La unidad SI de masa es el kilogramo. Como el segundo y el metro, el kilogramo es una unidad fundamental en el SI. La unidad de fuerza, el newton y las unidades de otras magnitudes que estudiaremos más adelante, tales como el momento lineal y la energía, se derivan de estas tres unidades fundamentales: segundo, metro y kilogramo.

[1] **g** se refiere a la aceleración de la gravedad, que es la aceleración (de un objeto en caída libre) relativa al suelo. No es completamente correcto atribuir esta aceleración únicamente a la atracción gravitatoria de la Tierra. La distinción se discutirá más adelante en el capítulo 11.

Como decíamos en la sección 4.2, el newton se define como la fuerza que produce la aceleración de 1 m/s² cuando actúa sobre 1 kg. Según la segunda ley de Newton,

$$1\ \text{N} = (1\text{kg})(1\ \text{m/s}^2) = 1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2 \tag{4.5}$$

Una unidad patrón conveniente de masa en la física atómica y nuclear es la **unidad de masa unificada** (u) que se define como la doceava parte de la masa del átomo neutro del carbono-12 (^{12}C). La unidad de masa unificada está relacionada con el kilogramo por

$$1\ \text{u} = 1{,}660\,540 \times 10^{-27}\ \text{kg} \tag{4.6}$$

La masa de un átomo de hidrógeno es aproximadamente 1 u.

Aunque en este texto utilizaremos generalmente unidades SI, en los EE.UU. es habitual el uso de un sistema basado en el pie, el segundo y la libra (unidad de fuerza). Este sistema difiere del SI en que se escoge como unidad fundamental una unidad de fuerza en lugar de una unidad de masa. La **libra** se definió originalmente como el peso de un cuerpo patrón determinado en un lugar concreto. Ahora se define como una fuerza igual a 4,448222 N. Redondeando a tres cifras, tenemos 1 lb ≈ 4,45 N. Como 1 kg pesa 9,81 N, su peso en libras es

$$9{,}81\ \text{N} = 2{,}20\ \text{lb} \tag{4.7}$$

PESO DE 1 KG

La unidad de masa en este sistema, llamada *slug*, se utiliza muy poco y se define como la masa de un objeto que pesa 32,2 lb. Cuando se trabaja en este sistema es más conveniente sustituir la masa m por w/g, en donde w es el peso en libras y g la aceleración de la gravedad en pies por segundo por segundo:

$$g = 32{,}2\ \text{pies/s}^2 \tag{4.8}$$

EJEMPLO 4.4 | Una estudiante acelerada

La fuerza neta que actúa sobre una estudiante de 130 lb es 25 lb fuerza. ¿Cuál es su aceleración?

Planteamiento del problema Aplicar $\Sigma F = ma$ y despejar la aceleración. La masa puede determinarse a partir del peso de la estudiante.

De acuerdo con la segunda ley de Newton, su aceleración es la fuerza dividida por su masa:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{F}{w/g} = \frac{25\ \text{lb}}{(130\ \text{lb})/(32{,}2\ \text{pies/s}^2)} = \boxed{6{,}19\ \text{pies/s}^2}$$

Ejercicio ¿Qué fuerza es necesaria para suministrar una aceleración de 3 pies/s² a un bloque de 5 lb? (*Respuesta* 0,466 lb.)

4.4 Las fuerzas en la naturaleza

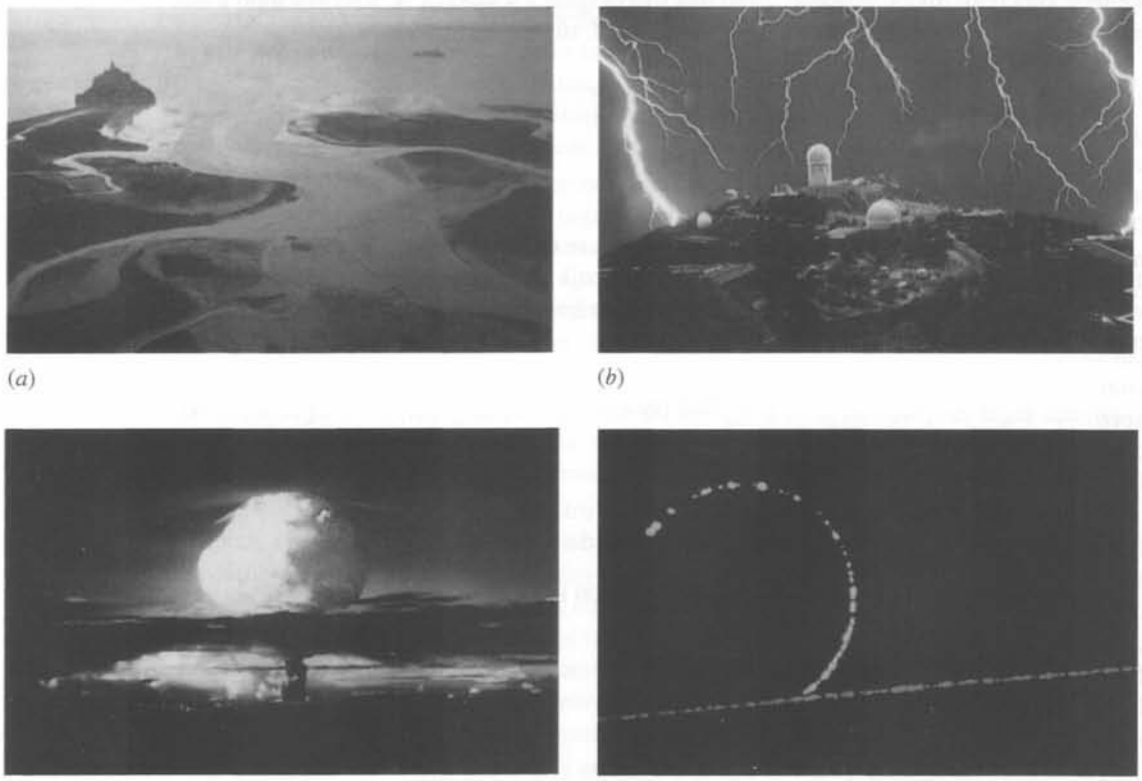
La gran potencia de la segunda ley de Newton se manifiesta cuando se combina con las leyes de las fuerzas que describen las interacciones de los objetos. Por ejemplo, la ley de Newton de la gravitación, que estudiaremos en el capítulo 11, nos expresa la fuerza gravitatoria ejercida por un objeto sobre otro en función de la distancia que separa los objetos y las masas de ambos. Esta ley de gravitación combinada con la segunda ley de Newton nos permite calcular las órbitas de los planetas alrededor del Sol, el movimiento de la Luna y las variaciones con la altura de g, aceleración de la gravedad.

Las fuerzas fundamentales

Todas las distintas fuerzas que se observan en la naturaleza pueden explicarse en función de cuatro interacciones básicas que ocurren entre partículas elementales (ver figura 4.2):

1. La fuerza gravitatoria. La fuerza de atracción mutua entre los objetos
2. La fuerza electromagnética. La fuerza entre las cargas eléctricas
3. La fuerza nuclear fuerte. La fuerza entre las partículas subatómicas
4. La fuerza nuclear débil. La fuerza entre las partículas subatómicas durante algunos procesos de decaimiento radiactivos

Las fuerzas cotidianas que observamos entre cuerpos macroscópicos se deben a la fuerza gravitatoria o a la fuerza electromagnética.



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

Figura 4.2 (*a*) La fuerza gravitatoria ejercida entre la Tierra y un cuerpo próximo a la superficie terrestre es el peso del cuerpo. La fuerza gravitatoria ejercida por el Sol sobre la Tierra y los demás planetas es la responsable de que éstos se mantengan en sus órbitas alrededor del Sol. De igual modo, la fuerza gravitatoria ejercida por la Tierra sobre la Luna mantiene a ésta en una órbita casi circular alrededor de la Tierra. Las fuerzas gravitatorias ejercidas por la Luna y el Sol sobre los océanos de la Tierra son responsables de las mareas. El Monte Saint-Michel (Francia) mostrado en esta foto se convierte en una isla cuando sube la marea. (*b*) La fuerza electromagnética incluye las fuerzas eléctrica y magnética. Un ejemplo familiar de las fuerza eléctrica es la atracción entre pequeños trozos de papel y un peine que se ha electrificado al pasarlo por el cabello. Los relámpagos sobre el Observatorio Nacional Kitt Peak que se muestran en la foto resultan de la fuerza electromagnética. (*c*) La fuerza nuclear fuerte tiene lugar entre las partículas elementales llamadas hadrones, que incluyen los protones y neutrones, constituyentes de los núcleos atómicos. Esta fuerza resulta de la interacción de los quarks, bloques constitutivos de los hadrones y es la responsable de mantener los núcleos estables. La explosión de la bomba de hidrógeno ilustrada en esta fotografía es un ejemplo de la potencia de esta fuerza. (*d*) La fuerza nuclear débil ocurre entre los leptones (que incluyen electrones y muones) y también entre hadrones (protones y neutrones). Esta fotografía de la cámara de niebla (en falso color) ilustra la interacción débil entre un muón de la radiación cósmica (verde) y un electrón (rojo) arrancado de un átomo.

Acción a distancia

Las fuerzas fundamentales gravedad y electromagnetismo actúan entre partículas separadas en el espacio. Esto crea un problema filosófico llamado **acción a distancia**. Newton consideraba la acción a distancia como un fallo de su teoría de la gravitación, pero evitaba dar cualquier otra hipótesis. Hoy el problema se evita introduciendo el concepto de campo, que actúa como un agente intermedio. Por ejemplo, la atracción de la Tierra por el Sol se considera en dos etapas. El Sol crea una condición en el espacio que llamamos campo gravitatorio. Este campo ejerce entonces una fuerza sobre la Tierra. Del mismo modo, la Tierra produce un campo gravitatorio que ejerce una fuerza sobre el Sol. Nuestro peso es la fuerza ejercida por el campo gravitatorio de la Tierra sobre nosotros mismos. Cuando estudiemos la electricidad y el magnetismo (capítulos 21–30) analizaremos los campos eléctricos, producidos por cargas eléctricas, y magnéticos, producidos por cargas eléctricas en movimiento.

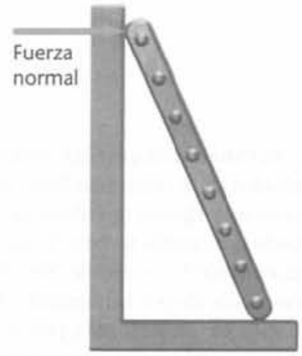


Figura 4.3 La pared sostiene la escalera ejerciendo sobre ella una fuerza normal a la pared.

Fuerzas de contacto

La mayor parte de las fuerza ordinarias que observamos sobre los objetos se ejercen por contacto directo. Estas fuerzas son de origen electromagnético y se ejercen entre las moléculas de la superficie de cada objeto.

Sólidos Si empujamos una superficie, está devuelve el empuje. Consideremos una escalera que se apoya contra una pared (figura 4.3). En la región de contacto, la escalera empuja la pared con una fuerza horizontal, comprimiendo las moléculas de la superficie de la pared. Como los muelles de un colchón, las moléculas comprimidas de la pared empujan la escalera con una fuerza horizontal. Tal fuerza, *perpendicular* a las superficies en contacto, se denomina **fuerza normal** (la denominación *normal* significa perpendicular). La superficie soporte se deforma ligeramente en respuesta a la carga, si bien esta deformación se aprecia difícilmente a simple vista.

Las fuerzas normales pueden variar dentro de un amplio intervalo de valores. Una mesa, por ejemplo, ejerce una fuerza normal dirigida hacia arriba sobre cualquier bloque que esté colocado sobre ella. A menos que el bloque sea tan pesado que la mesa se rompa, esta fuerza normal equilibrará la fuerza del peso del bloque. Además, si presionamos hacia abajo el bloque, la mesa ejercerá una fuerza soporte mayor que el peso del bloque para evitar que acelere hacia abajo.

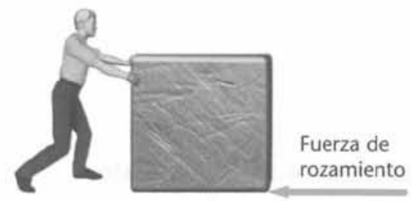


Figura 4.4 La fuerza de rozamiento ejercida por el suelo sobre el bloque se opone a su desplazamiento o a su tendencia a deslizar.

En ciertas circunstancias, los cuerpos en contacto ejercerán fuerzas entre sí que son *paralelas* a las superficies en contacto. Consideremos el bloque de la figura 4.4. Si se le empuja suavemente de lado no resbalará ya que la fuerza ejercida por el suelo se opone a que el bloque deslice. Si, en cambio, se empuja fuertemente, el bloque empezará a moverse en la dirección de la fuerza. Para mantener el movimiento es necesario ejercer continuamente una fuerza. A partir del instante en que se deja de empujar el bloque ralentiza su movimiento hasta que se para. La componente paralela de la fuerza de contacto ejercida por un cuerpo sobre otro se llama **fuerza de rozamiento**.

Aunque las fuerzas de rozamiento y normal se muestran en las figuras como si actuaran en un único punto, en realidad, se distribuyen sobre toda la región de contacto. Las fuerzas de rozamiento se tratan con más detalle en el capítulo 5.

Muelles Cuando un muelle se comprime o se alarga una pequeña cantidad Δx, la fuerza que ejerce, según se demuestra experimentalmente es

$$F_x = -k\,\Delta x \tag{4.9}$$

LEY DE HOOKE

en donde k es la constante de fuerza, una medida de la rigidez del muelle (figura 4.5). El signo negativo de la ecuación 4.9 significa que cuando el muelle se estira o comprime, la fuerza que ejerce es de sentido opuesto. Esta ecuación conocida como ley de Hooke es de gran interés. Un objeto en reposo bajo la influencia de fuerzas que se equilibran, se dice que está en equilibrio estático. Si un pequeño desplazamiento da lugar a una fuerza de restitución neta hacia la posición de equilibrio, se dice que el equilibrio es estable. Para pequeños desplazamientos, casi todas las fuerzas de restitución obedecen la ley de Hooke.

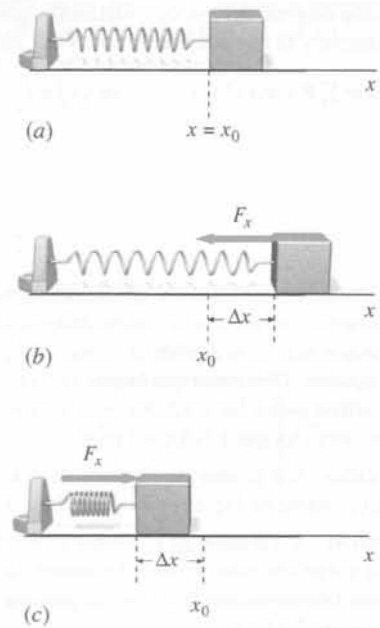


Figura 4.5 Muelle horizontal. (*a*) Cuando el muelle no está tenso, no ejerce ninguna fuerza sobre el bloque. (*b*) Cuando el muelle se estira, de modo que Δx es positivo, ejerce una fuerza de magnitud $k\,\Delta x$ en el sentido negativo de x. (*c*) Cuando el muelle se comprime, de modo que Δx es negativo, el muelle ejerce una fuerza de magnitud $k\,|\Delta x|$ en sentido positivo.

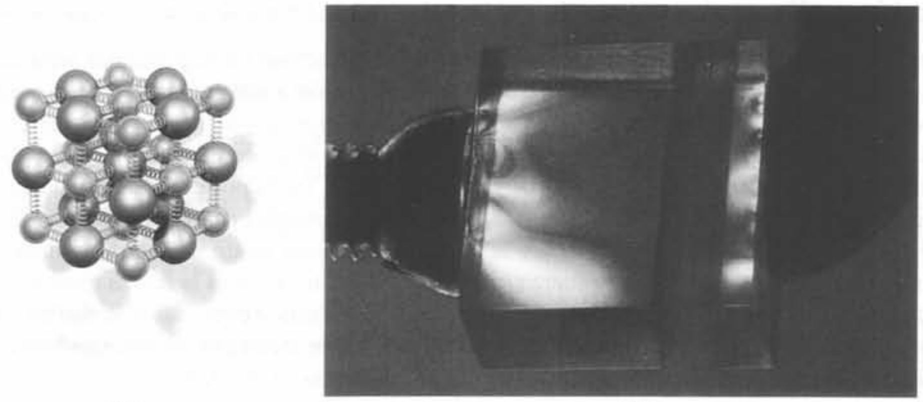


Figura 4.6 (*a*) Modelo de un sólido formado por átomos conectados entre sí por muelles elásticos. Los muelles son muy rígidos (constante de fuerza grande) de modo que cuando un peso actúa sobre el sólido, su deformación no es visible. Sin embargo, la compresión producida por la mordaza sobre un bloque de plástico en (*b*), da lugar a procesos elásticos que se hacen visibles mediante luz polarizada.

La fuerza molecular de atracción entre los átomos de una molécula o un sólido varía de un modo aproximadamente lineal con el cambio de su separación (para pequeños cambios); la fuerza varía de modo muy parecido al de un muelle. Por ello es frecuente representar el modelo de una molécula diatómica por dos masas conectadas por un muelle y el modelo de un sólido mediante una serie de masas conectadas por muelles como se muestra en la figura 4.6.

EJEMPLO 4.5 | El mate

Un jugador de baloncesto de 110 kg se cuelga del aro del cesto después de un mate espectacular (figura 4.7). Antes de dejarse caer, se queda colgando en reposo, con el anillo doblado hacia abajo una distancia de 15 cm. Suponiendo que el aro se comporta como un muelle elástico, calcular su constante de fuerza k.

Planteamiento del problema Como la aceleración del jugador es cero, la fuerza neta ejercida sobre él es nula. La fuerza hacia arriba ejercida por el aro equilibra su peso (figura 4.6). Sea $y = 0$ la posición original del aro, considerando y positiva hacia abajo. Por lo tanto, Δy es positivo, el peso mg es positivo y la fuerza ejercida por el aro, $-k\,\Delta y$ es negativa.

Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ al jugador, y despejar k:

$$\sum F_y = w_y + F_y = ma_y$$

$$mg + (-k\,\Delta y) = 0$$

$$k = \frac{mg}{\Delta y} = \frac{(110\text{ kg})(9{,}81\text{ N/kg})}{0{,}15\text{ m}}$$

$$= \boxed{7{,}19 \times 10^3\text{ N/m}}$$

Figura 4.7

Observación Aunque el aro del cesto no se parece mucho a un muelle, el aro está colgado por una bisagra con un muelle que se deforma cuando el aro se inclina. Como resultado, la fuerza hacia arriba que hace el aro sobre las manos del jugador es proporcional a la inclinación del aro y en sentido opuesto. Obsérvese que hemos utilizado para g las unidades N/kg, de modo que kg se cancela, y obtenemos para k las unidades N/m. Para g siempre puede usarse, a nuestra conveniencia, 9,81 N/kg o 9,81 m/s^2, ya que 1 N/kg = 1 m/s^2.

Ejercicio Un racimo de plátanos de 4 kg está suspendido en reposo de una balanza de muelle, cuya constante de fuerza es $k = 300$ N/m. ¿Cuánto se ha estirado el muelle? (*Respuesta* 13,1 cm.)

Ejercicio Un muelle, de constante de fuerza 400 N/m está conectado a un bloque de 3 kg que descansa sobre una pista de aire horizontal, de modo que el rozamiento es despreciable. ¿Qué alargamiento debe experimentar el muelle para que al liberar el bloque éste posea una aceleración de 4 m/s^2? (*Respuesta* 3,0 cm.)

Ejercicio de análisis dimensional Un objeto de masa m oscila en el extremo de un muelle de constante de fuerza k. El tiempo correspondiente a una oscilación completa es el periodo T. Suponiendo que T depende de m y k, utilizar el análisis dimensional para determinar la forma de la relación $T = f(m, k)$, prescindiendo de las constantes numéricas. El método más simple es considerar las unidades. Obsérvese que las unidades de k son N/m = (kg · m/s^2)/m = kg/s^2 y las unidades de m son kg. (*Respuesta* $T = C\sqrt{m/k}$ en donde C es una constante sin dimensiones. La expresión correcta para el periodo, como veremos en el capítulo 14 es $T = 2\pi\sqrt{m/k}$.)

Cuerdas Un cuerpo se puede arrastrar y mover mediante una cuerda. Se puede suponer que una cuerda es como un muelle pero con una constante de fuerza muy grande de forma que la deformación que adquiere al aplicar una fuerza es despreciable. Las cuerdas, sin embargo no son rígidas, ya que flexionan y se tuercen y, por lo tanto, no pueden usarse para empujar objetos como lo hacen los muelles sino que únicamente pueden tirar de ellos. La magnitud de la fuerza que un trozo de una cuerda ejerce sobre otro adyacente se denomina **tensión**. Por lo tanto, si se tira de un objeto con una cuerda, la magnitud de la fuerza coincide con la tensión. En la sección 4.7 se desarrolla con más detalle el concepto de tensión en una cuerda o en una cadena.

Ligaduras Un tranvía se mueve por el raíl. Un caballo de madera de una atracción se mueve en un círculo. Un trineo se mueve por la superficie de un estanque helado en un plano horizontal. Todos estos condicionantes sobre el movimiento de los objetos se denominan **ligaduras**.

4.5 Resolución de problemas: diagramas de fuerzas de sistemas aislados

Imaginemos un trineo tirado por un perro que avanza por un terreno helado. El perro tira de una cuerda ligada al trineo (figura 4.8) con una fuerza horizontal que hace que éste gane velocidad. Podemos pensar en el trineo y la cuerda como un único cuerpo. ¿Qué fuerzas actúan sobre el cuerpo trineo-cuerda? Tanto el perro como el hielo tocan el cuerpo, de modo que ambos ejercen fuerzas sobre él. También sabemos que la Tierra ejerce una fuerza gravitatoria sobre el trineo y la cuerda (el peso del cuerpo). Resumiendo, estas tres fuerzas actúan sobre el cuerpo (suponiendo el rozamiento despreciable):

1. El peso del cuerpo trineo-cuerda, **w**.
2. La fuerza de contacto $\mathbf{F}_n$ ejercida por el hielo (sin rozamiento, esta fuerza es perpendicular al hielo).
3. La fuerza de contacto **F** ejercida por el perro.

Un diagrama que muestra esquemáticamente todas las fuerzas que actúan sobre un sistema, tal como el de la figura 4.8 *b*, se denomina **diagrama del sistema aislado**. Se denomina diagrama del sistema aislado porque el objeto (el cuerpo) se dibuja sin su entorno. Para dibujar a escala los vectores fuerza en un diagrama de fuerzas de sistema aislado es necesario determinar primero, usando métodos cinemáticos, la dirección del vector aceleración. Sabemos que el objeto se mueve hacia la derecha con velocidad creciente y por lo tanto, que el vector aceleración va en la dirección de su movimiento, hacia la derecha. Obsérvese que $\mathbf{F}_n$ y **w** en el diagrama tienen magnitudes iguales. Los módulos deben ser iguales, ya que el trineo no acelera verticalmente. Como prueba de la corrección del diagrama del sistema aislado que hemos realizado, dibujamos el diagrama de la adición vectorial (figura 4.9) verificando que la suma de los vectores fuerza coincide con la dirección del vector aceleración.

La componente x de la segunda ley de Newton da

$$\sum F_x = F_{n,x} + w_x + F_x = ma_x$$
$$0 + 0 + F = ma_x$$

o

$$a_x = \frac{F}{m}$$

La componente y de la segunda ley de Newton expresa:

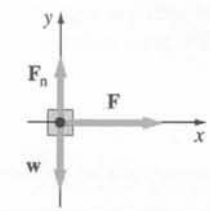
$$\sum F_y = F_{n,y} + w_y + T_y = ma_y$$
$$F_n - w + 0 = 0$$

o sea,

$$F_n = w$$

En este simple ejemplo hemos determinado dos magnitudes: la aceleración horizontal ($a_x = F/m$), y la fuerza vertical $\mathbf{F}_n$ ejercida por el hielo ($F_n = w$).

(*a*)



(*b*)

Figura 4.8 (*a*) Un perro tira de un trineo. El primer paso para resolver este problema es aislar el sistema que deseamos analizar. En este caso la curva cerrada de puntos aísla el cuerpo trineo-cuerda de sus alrededores. (*b*) Las fuerzas que actúan sobre el trineo de (*a*).

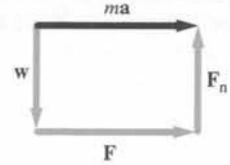


Figura 4.9

EJEMPLO 4.6 | Una carrera de trineos

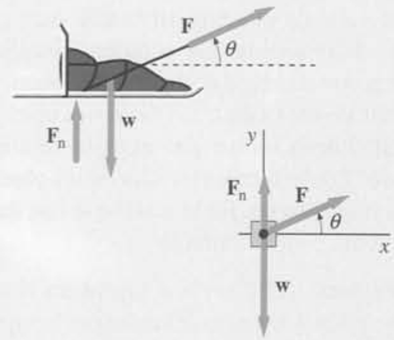


Figura 4.10

Durante las vacaciones de invierno, un joven participa en una carrera de trineos donde los estudiantes sustituyen a los perros. El joven comienza la carrera tirando de una cuerda atada al trineo con una fuerza de 150 N que forma un ángulo de 25° con la horizontal. La masa del cuerpo trineo-cuerda-pasajero es de 80 kg y el rozamiento entre el trineo y el hielo es despreciable. Determinar: (*a*) la aceleración del trineo y (*b*) la fuerza normal $\mathbf{F}_n$ ejercida por la superficie sobre el trineo.

Planteamiento del problema Tres fuerzas actúan sobre el cuerpo: su peso **w**, que actúa hacia abajo; la fuerza normal $\mathbf{F}_n$, que actúa hacia arriba; y la fuerza con que el joven tira de la cuerda, **F**, en dirección 25° sobre la horizontal. Como las fuerzas no coinciden en la misma línea de dirección, estudiaremos el sistema aplicando la segunda ley de Newton a las direcciones x e y por separado. Escogemos x en la dirección del movimiento e y perpendicular al hielo.

(a) 1. Dibujamos un diagrama de fuerzas (figura 4.10*b*) del trineo. Incluye un sistema de coordenadas en el cual uno de los ejes de coordenadas apunta en la dirección de la aceleración del trineo. El objeto se mueve hacia la derecha con velocidad creciente, por lo que sabemos que la aceleración va en esa dirección:

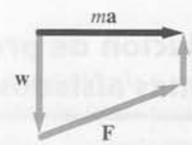


Figura 4.11

2. *Nota*: Se añaden los vectores fuerza en el diagrama (figura 4.11) para verificar que su suma va en la dirección de la aceleración:

3. Se aplica la segunda ley de Newton al objeto. Se escribe la ecuación tanto en forma vectorial como en sus componentes:

$$\mathbf{F}_n + \mathbf{w} + \mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

o

$$F_{n,x} + w_x + F_x = ma_x$$
$$F_{n,y} + w_y + F_y = ma_y$$

4. Se escriben las componentes x de $\mathbf{F}_n$, **w**, y **F**: $F_{n,x} = 0,\quad w_x = 0,\quad \text{y}\quad F_x = F\cos\theta$

5. Se sustituyen los resultados del paso 4 en la ecuación para la componente x del paso 3. Se resuelve para la aceleración a_x:

$$0 + 0 + F\cos\theta = ma_x$$
$$a_x = \frac{F\cos\theta}{m} = \frac{(150\text{ N})(\cos 25°)}{80\text{ kg}} = \boxed{1{,}70\text{ m/s}^2}$$

(b) 1. Se expresa la componente y de **a**: $a_y = 0$

2. Se escriben las componentes y de $\mathbf{F}_n$, **w**, y **F**: $F_{n,y} = F_n,\quad w_y = -mg,\quad \text{y}\quad F_y = F\,\text{sen}\,\theta$

3. Se sustituyen los resultados de los pasos b1 y b2 en la ecuación para la componente y del paso a3. Se resuelve entonces para F_n

$$\sum F_y = F_n - mg + F\,\text{sen}\,\theta = 0$$
$$F_n = mg - F\,\text{sen}\,\theta$$
$$= (80\text{ kg})(9{,}81\text{ N/kg}) - (150\text{ N})(\text{sen } 25°) = \boxed{721\text{ N}}$$

Observación Sólo la componente x de **F**, $F\cos\theta$, es la causa de la aceleración del cuerpo. Obsérvese también que el hielo soporta un peso inferior al peso total del cuerpo, pues la componente $F\,\text{sen}\,\theta$ es soportada por la cuerda.

Comprobar el resultado Si $\theta = 0$, el cuerpo es acelerado por una fuerza F y el hielo soporta todo su peso. Nuestros resultados concuerdan, ya que en este caso darían $a_x = F/m$ y $F_n = mg$.

Ejercicio ¿Si $\theta = 25$ cuál es la mayor fuerza F que puede aplicarse a la cuerda sin levantar el trineo de la superficie? (*Respuesta* $F = 1{,}86$ kN.)

El ejemplo 4.6 ilustra un método general para resolver problemas utilizando las leyes de Newton:

1. Dibujar un diagrama claro.
2. Aislar el objeto (partícula) que nos interesa y dibujar un diagrama que muestre todas las fuerzas que actúan sobre el objeto. Si existe más de un objeto de interés en el problema, dibujar un diagrama análogo para cada uno de ellos. Elegir un sistema de coordenadas conveniente para cada objeto e incluirlo en el diagrama de fuerzas para este objeto. Si se conoce la dirección de la aceleración, se elige un eje de coordenadas que sea paralelo a ella. Para objetos que resbalan o que se deslizan por una superficie, hay que escoger un eje de coordenadas paralelo a la superficie y otro perpendicular a ella.

3. Aplicar la segunda ley de Newton, $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$, en forma de componentes.
4. En problemas donde hay dos o más objetos, para simplificar las ecuaciones que se obtienen de aplicar $\Sigma\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ hay que usar la tercera ley de Newton, $\mathbf{F}_{A,B} = -\mathbf{F}_{B,A}$ y todas las ligaduras.
5. Despejar las incógnitas de las ecuaciones resultantes.
6. Comprobar si los resultados tienen las unidades correctas y parecen razonables. Sustituir valores extremos en la solución es un buen sistema para comprobar si se han cometido errores.

RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS MEDIANTE LAS LEYES DE NEWTON

EJEMPLO 4.7 | Descarga de un camión

¡PÓNGALO EN SU CONTEXTO!

Suponga que trabaja para una gran compañía de transporte y que debe descargar una caja enorme y frágil desde un camión usando una rampa como la que se muestra en la figura 4.12. Si la velocidad vertical con que llega la caja al final de la rampa es superior a 2,5 m/s (la velocidad que adquiere un objeto si cae desde una altura de 30,5 cm), su carga se daña. ¿Cuál es el mayor ángulo posible al que se puede instalar la rampa para conseguir una descarga segura? La rampa debe superar un metro de altura, está formada por rodillos (se puede suponer que no ejerce rozamiento) y está inclinada con la horizontal un ángulo ϑ.

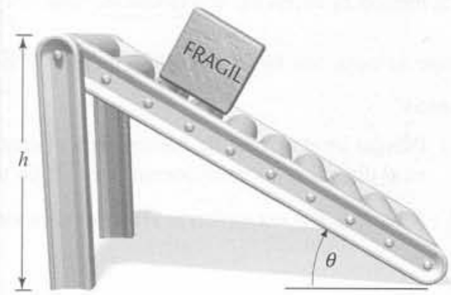


Figura 4.12

Planteamiento del problema Sobre la caja actúan dos fuerzas, el peso $\mathbf{w}$ y la fuerza normal $\mathbf{F}_n$. Como estas fuerzas no son paralelas no pueden sumar cero, con lo cual, hay una fuerza resultante sobre el objeto que lo acelera. La rampa hace que la caja se mueva paralela a su superficie, por lo que elegimos la dirección de la pendiente de la rampa como la dirección x. Para determinar la aceleración aplicamos la segunda ley de Newton a la caja. Cuando sepamos el valor de la aceleración, podremos usar un cálculo cinemático para determinar el mayor ángulo de la pendiente para el que podemos asegurar una descarga segura.

1. Se establece una relación entre la componente hacia abajo de la velocidad de la caja y la velocidad v a lo largo de la rampa: $\quad v_d = v \text{ sen } \theta$
2. La velocidad v está relacionada con el desplazamiento Δx a lo largo de la rampa mediante la ecuación cinemática siguiente: $\quad v^2 = v_0^2 + 2a_x\,\Delta x$
3. Para determinar a_x aplicamos a la caja la segunda ley de Newton ($\Sigma F_x = ma_x$). Dibujamos el diagrama de la figura 4.13 donde vemos que actúan dos fuerzas, el peso y la normal. Elegimos la dirección de la aceleración, en la dirección de la rampa hacia abajo, como dirección $+x$:

Nota: Como se ve en el diagrama, el ángulo entre $\mathbf{w}$ y el sentido negativo del eje y es el mismo que el ángulo entre la pendiente de la rampa y la horizontal. También se puede ver que $w_x = w \text{ sen } \theta$.

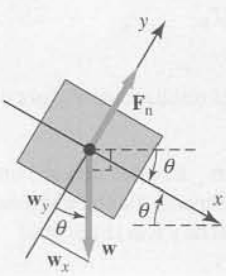


Figura 4.13

4. Se aplica la segunda ley de Newton y se obtiene: $\quad F_{n,x} + w_x = ma_x$

   donde

   Nota: F_n es perpendicular al eje x y $w = mg$. $\quad F_{n,x} = 0 \quad \text{y} \quad w_x = w \text{ sen } \theta = mg \text{ sen } \theta$
5. Se sustituye y despeja la aceleración obteniendo: $\quad 0 + mg \text{ sen } \theta = ma_x$

   por lo que

   $a_x = g \text{ sen } \theta$
6. Se sustituye a_x en la ecuación cinemática (paso 2), haciendo $v_0 = 0$, con lo cual: $\quad v^2 = 2g \text{ sen } \theta\,\Delta x$
7. De la figura 4.12 se ve que cuando Δx es la longitud de la rampa, $\Delta x \text{ sen } \theta = h$, donde h es la altura de la rampa: $\quad v^2 = 2gh$
8. Mediante el uso de $v_d = v \text{ sen } \theta$, se obtiene para v_d: $\quad v_d = \sqrt{2gh} \text{ sen } \theta$
9. Se despeja el ángulo máximo y se obtiene:

$$2{,}5 \text{ m/s} = \sqrt{2(9{,}81 \text{ m/s}^2)(1{,}0 \text{ m})} \text{ sen } \theta_{\text{máx}}$$

$$\theta_{\text{máx}} = \boxed{34{,}4°}$$

Observación La aceleración por la rampa hacia abajo es constante e igual a g sen θ. Asimismo, la velocidad v al final de la rampa ($v = \sqrt{2gh}$) no depende del ángulo θ

Ejercicio Aplicar $\Sigma F_y = ma_y$ a la caja y demostrar que $F_n = mg \cos \theta$.

EJEMPLO 4.8 | Colgando un cuadro

¡INTÉNTELO USTED MISMO!

Un cuadro que pesa 8 N se aguanta mediante dos cables que ejercen tensiones T_1 y T_2, tal como indica la figura 4.14. Determinar la tensión de los dos cables.

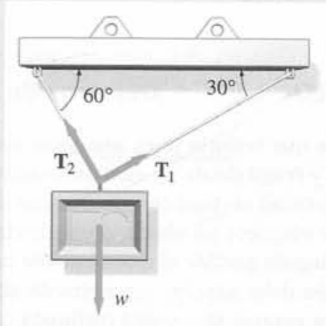


Figura 4.14

Planteamiento del problema Como el cuadro no posee aceleración, la fuerza neta que actúa sobre el mismo debe ser nula. Las tres fuerzas que actúan sobre el cuadro, su peso mg, la tensión T_1 y la tensión T_2 deben dar una resultante nula.

Tape la columna de la derecha e intente resolverlo usted mismo

Pasos	Respuestas
1. Dibujar un diagrama de fuerzas para el cuadro (figura 4.15). Mostrar en el diagrama las componentes x e y de las tensiones.	
2. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ en forma vectorial al cuadro.	$\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 + \mathbf{w} = m\mathbf{a}$
3. Descomponer cada fuerza en sus componentes x e y. Así se obtienen dos ecuaciones para las incógnitas T_1 y T_2.	$T_{1,x} + T_{2,x} + w_x = 0$ $T_{1,y} + T_{2,y} + w_y = 0$ $T_1 \cos 30° - T_2 \cos 60° + 0 = 0$ $T_1 \text{ sen } 30° - T_2 \text{ sen } 60° - w = 0$
4. Resolver la ecuación de la componente x para T_2 en función de T_1.	$T_2 = T_1 \dfrac{\cos 30°}{\cos 60°} = T_1\sqrt{3}$
5. Aplicar el valor de T_2 en la ecuación de la componente y del paso 3 y despejar T_1.	$T_1 \text{ sen } 30° + (T_1\sqrt{3}) \text{ sen } 60° - \text{w} = 0$ $T_1 = \frac{1}{2}\text{w} = \boxed{4 \text{ N}}$
6. Utilizar el resultado de T_1 para obtener T_2.	$T_2 = T_1\sqrt{3} = \boxed{6{,}93 \text{ N}}$

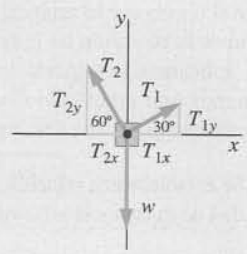


Figura 4.15

Observación El cable más próximo a la vertical es el que soporta la mayor contribución del peso, como era de esperar. También vemos que $T_1 + T_2 > 8$N. La fuerza "extra" es debida a los cables que tiran a la derecha y a la izquierda.

EJEMPLO 4.9 | Un avión que acelera

Cuando un avión acelera en la pista del aeropuerto para despegar, un viajero decide determinar su aceleración mediante su yo-yo y comprueba que la cuerda del mismo forma un ángulo de 22° con la vertical (figura 4.16*a*). (*a*) ¿Cuál es la aceleración del avión? (*b*) Si la masa del yo-yo es de 40 g, ¿cuál es la tensión de la cuerda?

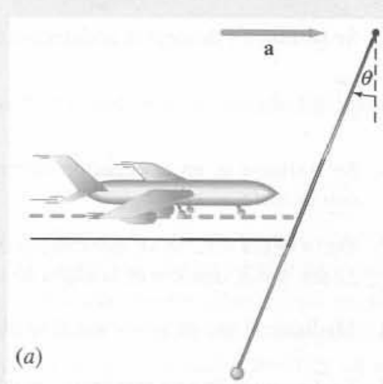


Figura 4.16

Planteamiento del problema El avión y el yo-yo tienen la misma aceleración hacia la derecha. La fuerza neta del yo-yo es en la dirección de su aceleración. Esta fuerza viene suministrada por la componente horizontal de la tensión **T**. La componente vertical de **T** equilibra el peso del yo-yo. Elegimos un sistema de coordenadas en el cual la dirección x es paralela al vector aceleración **a** y la dirección y es vertical. Expresando la ley de Newton para ambas direcciones x e y se obtienen dos ecuaciones que nos permiten calcular las dos incógnitas, a y T.

(a) 1. Dibujar un diagrama de fuerzas para el yo-yo (figura 4.16*b*). Elegir la dirección positiva del eje x en la dirección de la aceleración.

2. Aplicar $\Sigma \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ según el método de las componentes para el yo-yo:

$$T_x + w_x = ma_x$$
$$T \text{ sen } \theta + 0 = ma_x$$
o
$$T \text{ sen } \theta = ma_x$$

3. Aplicar $\Sigma F_y = ma_y$ al yo-yo. Mediante la trigonometría y $w = mg$, simplificar (figura 4.16*c*). La aceleración apunta en la dirección positiva del eje *x*, por lo tanto $a_y = 0$:

$$T_y = w_y = ma_y$$
$$T \cos \theta - mg = 0$$
o
$$T \cos \theta = mg$$

4. Dividir el resultado del paso 2 por el del paso 3 y despejar la aceleración. El vector aceleración señala en la dirección positiva del eje *x*, con lo que $a = a_x$:

$$\frac{T \text{ sen } \theta}{T \cos \theta} = \frac{ma_x}{mg}$$
o
$$a = g \text{ tg } \theta = (9{,}81 \text{ m/s}^2) \text{ tg } 22° = \boxed{3{,}96 \text{ m/s}^2}$$

(b) Despejar la tensión, usando el resultado del paso 3:

$$T = \frac{mg}{\cos \theta} = \frac{(0{,}04 \text{ kg})(9{,}81 \text{ m/s}^2)}{\cos 22°} = \boxed{0{,}423 \text{ N}}$$

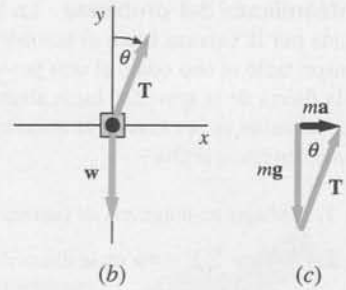


Figura 4.16

Observación T es mayor que el peso del yo-yo ($mg = 0{,}392$ N), ya que la cuerda no sólo evita que caiga el yo-yo, sino que también lo acelera en dirección horizontal. En este caso utilizaremos para g las unidades m/s², ya que estamos calculando una aceleración.

Comprobar el resultado Para $\theta = 0$, resulta $T = mg$ y $a = 0$.

Ejercicio ¿Para qué aceleración a la tensión de la cuerda sería igual a 3 mg? ¿Cuánto valdría θ en este caso? (*Respuestas* $a = 27{,}8$ m/s², $\theta = 70{,}5°$.)

El ejemplo siguiente aplica las leyes de Newton a objetos que están en reposo relativo respecto a un sistema de referencia acelerado.

EJEMPLO 4.10 | Su peso en un ascensor

Un hombre de 80 kg está de pie sobre una balanza de muelle sujeta al suelo de un ascensor. La balanza está calibrada en newtons. ¿Qué peso indicará la balanza cuando (*a*) el ascensor se mueve con aceleración *a* hacia arriba; (*b*) el ascensor se mueve con aceleración descendente *a'*; (*c*) el elevador se mueve hacia arriba a 20 m/s, mientras su velocidad decrece a razón de 8 m/s²?

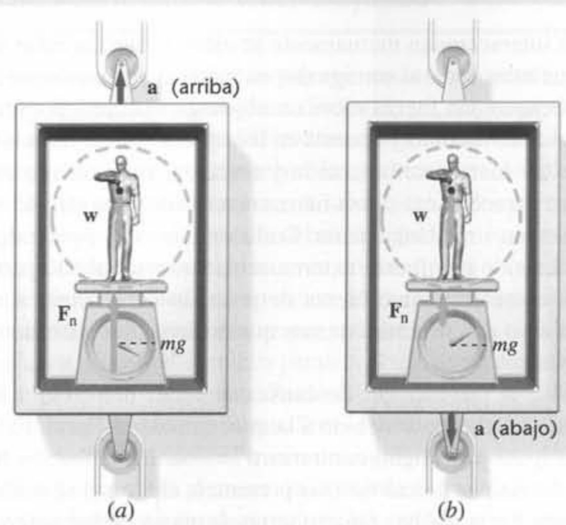


Figura 4.17

Planteamiento del problema La lectura de la balanza es el módulo de la fuerza normal F_n ejercida por la balanza sobre el hombre (figura 4.17). Como el hombre está en reposo respecto al ascensor, tanto el uno como el otro poseen la misma aceleración. Sobre el hombre actúan dos fuerzas: la fuerza de la gravedad hacia abajo, mg y la fuerza normal de la balanza, F_n, hacia arriba. La suma de ambas es la causa de la aceleración observada sobre el hombre. Elegiremos como positiva la dirección hacia arriba.

(a) 1. Dibujar un diagrama de fuerzas para el hombre:

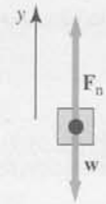


Figura 4.18

2. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ en la dirección y:

$$F_{n,y} + w_y = ma_y$$
$$F_n - mg = ma$$

3. Despejar F_n. Esta es la lectura de la balanza (el peso aparente del hombre):

$$F_n = mg + ma = \boxed{m(g+a)}$$

(b) 1. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ en la dirección y para el caso en que el ascensor acelera hacia abajo con aceleración a':

$$F_{n,y} + w_y = ma_y$$
$$F_n - mg = m(-a')$$

2. Despejar F_n:

$$F_n = mg - ma' = \boxed{m(g-a')}$$

(c) 1. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ en la dirección y. Obsérvese que la aceleración del ascensor está dirigida hacia abajo:

$$F_{n,y} + w_y = ma_y$$

2. Despejar F_n:

$$F_n - mg = ma_y$$
$$F_n = m(g + a_y) = (80\text{ kg})(9{,}81\text{ m/s}^2 - 8{,}00\text{ m/s}^2) = \boxed{145\text{ N}}$$

Observación Cuando el ascensor acelera hacia arriba, ya sea en su ascenso o descenso, el peso aparente del hombre es mayor que mg en la cantidad ma. Para el hombre todo ocurre como si la gravedad se incrementase de g a $g + a$. Cuando el ascensor acelera hacia abajo, el peso aparente del hombre es menor que mg en la cantidad ma'. El hombre se siente más ligero, como si la gravedad fuera $g - a'$. Si $a' = g$, el ascensor estaría en caída libre y el hombre experimentaría la ingravidez.

Ejercicio Un ascensor que desciende a la planta baja llega a una parada con una aceleración de 4 m/s^2. Si una persona de 70 kg se encuentra sobre una balanza en el interior de este ascensor, ¿qué peso marcará la balanza cuando el ascensor está deteniéndose? (*Respuesta* 967 N.)

Ejercicio Un hombre está sobre una balanza dentro de un ascensor que tiene una aceleración ascensional a. La balanza mide 960 N. El hombre coge una caja de 20 kg. y la balanza mide entonces 1200 N. Determinar la masa del hombre, su peso, y la aceleración a.

4.6 La tercera ley de Newton

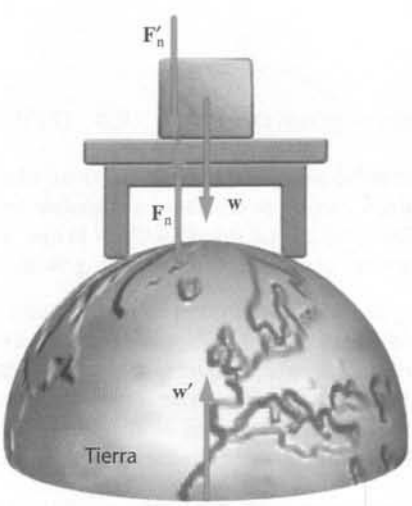


Figura 4.19

Cuando dos cuerpos interaccionan mutuamente se ejercen fuerzas entre sí. La tercera ley de Newton establece que estas fuerzas son iguales en módulo y van en direcciones opuestas. Es decir, si un objeto A ejerce una fuerza sobre un objeto B, el objeto B ejerce una fuerza sobre el objeto A que es igual en módulo y opuesta en dirección. Así las fuerzas se dan en pares. Es común referirse a estas fuerzas como acción y reacción, sin embargo esta terminología es desafortunada porque parece como si una fuerza reaccionara a la otra, lo cual no es cierto, ya que ambas fuerzas actúan simultáneamente. **Cada una de ellas puede denominarse acción o bien reacción.** Si cuando una fuerza externa actúa sobre un objeto particular la llamamos fuerza de acción, la correspondiente fuerza de reacción debe actuar sobre un objeto diferente. Así en ningún caso dos fuerzas externas que actúan sobre un único objeto constituyen un par acción-reacción.

En la figura 4.19 se ve una caja que descansa encima de una mesa. La fuerza hacia abajo que actúa sobre la caja es el peso $\mathbf{w}$ debido a la atracción de la Tierra. El bloque ejerce sobre la Tierra una fuerza igual y de signo contrario $\mathbf{w}' = -\mathbf{w}$. Estas fuerzas forman pues un par acción-reacción. Si fueran las únicas fuerzas presentes, el bloque se aceleraría hacia abajo y la Tierra se aceleraría hacia arriba. Sin embargo, la mesa ejerce sobre la caja una fuerza hacia arriba $\mathbf{F}_n$ que compensa el peso. La caja también ejerce una fuerza sobre la mesa $\mathbf{F}'_n = -\mathbf{F}_n$ hacia abajo. Las fuerzas $\mathbf{F}_n$ y $\mathbf{F}'_n$ forman un par acción-reacción.

Ejercicio ¿Las fuerzas **w** y $\mathbf{F}_n$ de la figura 4.19 forman un par acción-reacción? (*Respuesta* No, no lo forman. Estas fuerzas son externas y ambas actúan sobre el mismo objeto, la caja. Por lo tanto no pueden constituir un par acción-reacción.)

EJEMPLO 4.11 | El caballo y el carro

El caballo de la figura 4.20*a* rechaza tirar del carro porque razona: "de acuerdo con la tercera ley de Newton, cualquiera que sea la fuerza que ejerza sobre el carro, éste ejercerá una fuerza igual y de sentido contrario sobre mi, por lo que la fuerza neta será cero y no habrá ninguna opción para acelerarlo". ¿Dónde está la incorrección en este argumento?

Planteamiento del problema Estamos interesados en el movimiento del carro, y, por lo tanto, dibujamos un diagrama de fuerzas para él (figura 4.20*b*). La fuerza ejercida por el caballo en los arreos se designa por **F**. (Los arreos están atados al carro, por lo que los consideramos como parte del carro.) Hay otras fuerzas que actúan sobre el carro, como el peso **w**, la fuerza que ejerce el suelo $\mathbf{F}_n$, y la fuerza horizontal ejercida por el pavimento, **f** (fuerza de rozamiento).

1. Dibujar el diagrama de fuerzas para el carro (véase la figura 4.20*c*). El carro no acelera verticalmente, por lo que la suma de fuerzas en la dirección vertical es cero. Las fuerzas horizontales son **F** que va hacia la derecha y **f** que va hacia la izquierda. El carro acelerará si $\mathbf{F} > \mathbf{f}$.
2. Nótese que la fuerza de reacción a **F**, que denominamos $\mathbf{F}'$ se ejerce sobre el caballo, no sobre el carro (figura 4.20*d*), y no tiene ningún efecto sobre el movimiento del carro, sino que afecta al movimiento del caballo. Si el caballo acelera hacia la derecha, debe haber una fuerza $\mathbf{F}_P$ (hacia la derecha) ejercida por el pavimento sobre las pezuñas del caballo mayor que $\mathbf{F}'$.

Observación Este ejemplo ilustra la importancia de dibujar un diagrama de fuerzas cuando se resuelven problemas de mecánica. Si el caballo lo hubiera hecho, hubiera comprendido que le bastaba con empujar con fuerza sobre el pavimento para que éste le proporcionara la fuerza para moverlo hacia delante.

Ejercicio Colóquese frente a un amigo y pongan las palmas de sus manos una contra otra. ¿Su amigo puede ejercer sobre usted fuerza si usted no se resiste? Inténtelo.

Ejercicio Verdadero o falso: La fuerza ejercida por el carro sobre el caballo es igual y opuesta a la fuerza ejercida por el caballo sobre el carro, pero sólo cuando el caballo y el carro no aceleran. (*Respuesta* ¡Falso! Un par de fuerzas acción-reacción describe la interacción entre dos objetos. Una fuerza no puede existir sin la otra. Ambas son *siempre* iguales y opuestas.)

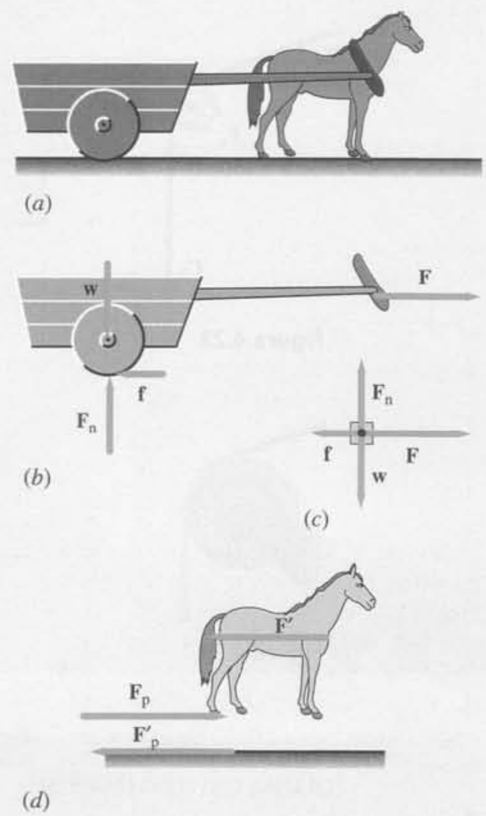


Figura 4.20

4.7 Problemas con dos o más objetos

Algunos problemas tratan de dos o más cuerpos que están en contacto o conectados a una cuerda o muelle. Estos problemas se resuelven dibujando un diagrama de fuerzas para cada cuerpo y después aplicando la segunda ley de Newton a cada uno de ellos. Las ecuaciones resultantes, junto con otras ecuaciones que describen las restricciones establecidas, se resuelven simultáneamente para las fuerzas o aceleraciones desconocidas. Si los cuerpos están en contacto directo, las fuerzas que se ejercen mutuamente deben ser iguales y opuestas, como establece la tercera ley de Newton. Dos cuerpos que se mueven en línea recta y que estén conectados por una cuerda tensa deben tener la misma componente de la aceleración paralela a la cuerda, ya que el movimiento paralelo a ésta de ambos cuerpos es idéntico. Si la cuerda pasa por una pinza o polea, la frase "paralela a la cuerda" significa paralela al segmento atado al objeto.

Consideremos el movimiento de Steve y Paul en la figura 4.21. La velocidad con la cual Paul baja se iguala con la velocidad con la que Steve resbala por el glaciar, es decir, la componente de la velocidad de Paul paralela al tramo de cuerda al que está sujeto se iguala con la componente de la velocidad paralela al tramo de la cuerda al que está sujeto Steve. Estas dos componentes de la velocidad deben ser siempre iguales y si Steve y Paul varían su velocidad lo deben hacer al unísono. Lo mismo ocurre con las componentes de la aceleración paralelas a la cuerda.

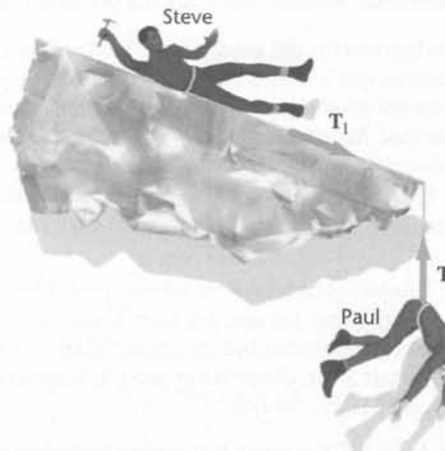


Figura 4.21

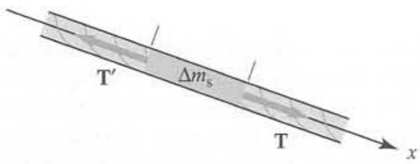


Figura 4.22

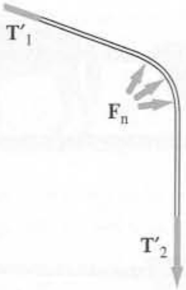


Figura 4.23

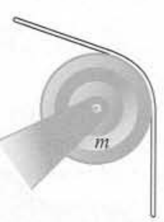


Figura 4.24

La tensión en una cadena o una cuerda es el módulo de la fuerza que un segmento de la cuerda ejerce sobre el inmediatamente contiguo. La tensión puede variar a través de la cuerda, como en el caso de una cuerda que cuelga del techo de un gimnasio, donde la tensión en el trozo que está junto al techo es mayor, ya que en esa zona se aguanta también el peso de toda la cuerda. Sin embargo, en los problemas que trataremos en este libro, no se suele considerar la masa de las cuerdas y de las cadenas, ya que se suponen pequeñas, de forma que la variación en la tensión debida al peso de la cuerda o de la cadena es despreciable y, por lo tanto, también se desprecian las variaciones en la tensión debidas a alguna aceleración de la cuerda. Para verlo, consideremos el diagrama de la figura 4.22, donde se muestra la cuerda a la que está atado Steve, donde Δm_s es la masa del segmento de cuerda.

Aplicando la segunda ley de Newton a este segmento se obtiene $T - T' = \Delta m_s a_x$. Si la masa del segmento de cuerda es despreciable, entonces $T = T'$ y no se necesita una fuerza neta para darle una aceleración. (Es decir, sólo se necesita una diferencia de tensión despreciable para dar a un trozo de cuerda de masa despreciable una aceleración finita.)

Ahora consideramos toda la cuerda que une a Steve y Paul. Si despreciamos la gravedad, sobre la cuerda actúan tres fuerzas. Steve y Paul, cada uno, ejercen una fuerza, como también lo hace el hielo del borde del glaciar. Despreciar cualquier rozamiento entre el hielo y la cuerda significa que la fuerza ejercida por el hielo siempre es una fuerza normal (véase la figura 4.23), y una fuerza normal nunca tiene una componente a lo largo de la cuerda, por lo que no puede producir ningún cambio en la tensión. Así la tensión es la misma en toda la cuerda. En resumen, si una cuerda de masa despreciable cambia de dirección pasando por una superficie sin rozamiento, la tensión es la misma en toda la cuerda.

Ejercicio Supongamos que la cuerda del ejemplo anterior, en vez de pasar por el borde de un glaciar, pase por una polea que tiene unos cojinetes que no ejercen rozamiento, como se muestra en la figura 4.24. ¿La tensión será la misma a lo largo de toda la cuerda? (*Respuesta* No. Una cosa es que no haya rozamiento entre los cojinetes y la polea, pero otra cosa es que la polea tenga masa, es decir, inercia. Para cambiar la velocidad de rotación de la polea se necesita una diferencia de tensión.)

EJEMPLO 4.12 | Los escaladores

Paul (masa m_P) se cae por el borde de un glaciar. Afortunadamente está atado mediante una larga cuerda a Steve (masa m_S), que lleva un piolet. Antes de que Steve clave su piolet para detener el movimiento, desliza sin rozamiento por la superficie de hielo, atado a Paul por una cuerda (figura 4.21). Se supone que tampoco existe rozamiento entre la cuerda y el acantilado. Determinar la aceleración de cada persona y la tensión de la cuerda.

Planteamiento del problema Las tensiones de la cuerda $\mathbf{T}_1$ y $\mathbf{T}_2$ son de igual módulo T porque se supone que la cuerda es de masa despreciable y el acantilado se supone que carece de rozamiento. La cuerda no se alarga ni se encoge, de modo que Paul y Steve tienen siempre el mismo módulo de velocidad. Sus aceleraciones a_P y a_S son, por lo tanto, iguales en módulo, pero no en dirección. Steve acelera por la superficie del glaciar, mientras que Paul lo hace verticalmente hacia abajo.

La aceleración de cada persona está relacionada con las fuerzas que actúan sobre él por la segunda ley de Newton. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ a cada una y despejar la aceleración y la tensión.

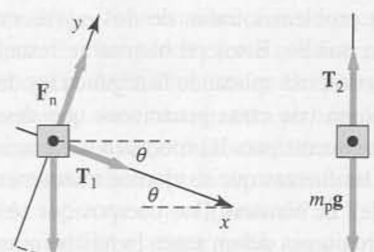


Figura 4.25

1. Dibujar los diagramas de fuerzas que actúan aisladamente sobre Paul y Steve. Poner los ejes x e y en el diagrama correspondiente a Steve, escogiendo como dirección positiva del eje x la dirección de la aceleración de Steve. Elegir la dirección de la aceleración de Paul como dirección positiva del eje x'

2. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ en la dirección horizontal a Steve: $F_{n,x} + T_{1,x} + m_S g_x = m_S a_{S,x}$

3. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ a Paul: $T_{2,x'} + m_P g_{x'} = m_P a_{P,x'}$

4. Ambos se mueven en línea recta y están unidos por un segmento de cuerda que no se estira, por lo tanto las aceleraciones de Paul y de Steve están relacionadas. Expresar esta relación:

$$a_{P,x} = a_{S,x} = a_x$$

5. Dado que la cuerda tiene una masa despreciable y resbala sobre el hielo con rozamiento despreciable, las fuerzas $\mathbf{T}_1$ y $\mathbf{T}_2$ están relacionadas. Expresar esta relación:

$$T_2 = T_1 = T$$

6. Sustituir los resultados de los pasos 4 y 5 en las ecuaciones del paso 2 y del paso 3:

$$T + m_S g \operatorname{sen} \theta = m_S a_x$$
$$-T + m_P g = m_P a_x$$

7. Resolver las ecuaciones del paso 6 para la aceleración eliminando T y despejando a_x:

$$a_x = \boxed{\frac{m_S \operatorname{sen} \theta + m_P}{m_S + m_P} g}$$

8. Sustituir el resultado del paso 7 en las dos ecuaciones del paso 6 y despejar T:

$$T = \boxed{\frac{m_S m_P}{m_S + m_P}(1 - \operatorname{sen} \theta) g}$$

Observación En el paso 3 se elige la dirección hacia abajo como positiva para que la solución sea lo más simple posible. Con esta aceleración, cuando Steve se mueve en dirección positiva (hacia la derecha), Paul se mueve también en dirección positiva (hacia abajo).

Comprobar el resultado Si m_P es mucho mayor que m_S, es de esperar que la aceleración sea aproximadamente igual a g y la tensión aproximadamente cero. Sustituyendo $m_s = 0$ realmente nos da $a = g$ y $T = 0$. Si m_p es mucho menor que m_s, esperamos que la aceleración sea aproximadamente $g \operatorname{sen} \theta$ (véase el ejemplo 4.8) y que la tensión sea cero. Sustituyendo $m_p = 0$ en los pasos 7 y 8, obtenemos $a_x = g \operatorname{sen} \theta$ y $T = 0$. Comprobamos nuestras respuestas en el valor límite de la pendiente ($\theta = 90°$) y obtenemos $a_x = g$ y $T = 0$. Esto parece correcto ya que si $\theta = 90°$ Steve y Paul experimentan una caída libre.

Ejercicio (*a*) Determinar la aceleración si $\theta = 15°$ y las masas son $m_S = 78$ kg y $m_P = 92$ kg. (*b*) Determinar la aceleración si los valores de estas dos masas se intercambian. (*Respuestas* (*a*) $a_x = 0{,}660g$, (*b*) $a_x = 0{,}599g$.)

EJEMPLO 4.13 | Construyendo una estación espacial

¡INTÉNTELO USTED MISMO!

Un astronauta que construye una estación espacial empuja un bloque de masa m_1 con una fuerza $\mathbf{F}_A$. Este bloque está en contacto directo con un segundo bloque de masa m_2 (figura 4.26). (*a*) ¿Cuál es la aceleración de las cajas? (*b*) ¿Cuál es el módulo de la fuerza ejercida por una caja sobre la otra?

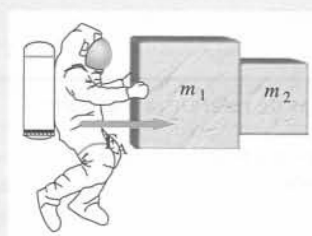


Figura 4.26

Planteamiento del problema Sea $\mathbf{F}_{2,1}$ la fuerza ejercida por m_2 sobre m_1 y $\mathbf{F}_{1,2}$ la fuerza ejercida por m_1 sobre m_2. Estas fuerzas son iguales y opuestas ($\mathbf{F}_{2,1} = -\mathbf{F}_{1,2}$), de manera que $F_{2,1} = F_{1,2}$. Aplicar la segunda ley de Newton a cada bloque por separado y tener en cuenta que las aceleraciones a_1 y a_2 son iguales.

Tape la columna de la derecha e intente resolverlo usted mismo

Pasos	Respuestas
(a) 1. Dibujar los diagramas de fuerzas de cada uno de los dos bloques (figura 4.27).	
2. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ al primer bloque.	$F_A - F_{2,1} = m_1 a_{1,x}$
3. Aplicar $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ al segundo bloque.	$F_{1,2} = m_2 a_{2,x}$
4. Expresar la relación entre las dos aceleraciones y la relación entre los módulos de las fuerzas que se ejercen los bloques entre sí.	$a_{2,x} = a_{1,x} = a_x$ $F_{2,1} = F_{1,2} = F$
5. Sustituir estas relaciones en los resultados de los pasos 2 y 3 y despejar a_x.	$a = \boxed{\dfrac{F_A}{m_1 + m_2}}$
(b) Sustituir la expresión para a_x en los pasos 2 o 3 y despejar F.	$F = \boxed{\dfrac{m_2}{m_1 + m_2} F_A}$

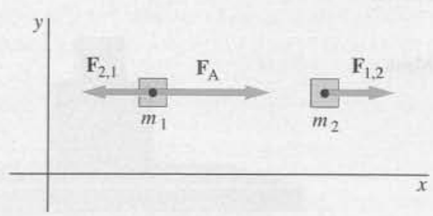


Figura 4.27

Observación El resultado del paso 5 es el mismo que obtendríamos si la fuerza F_A actuase sobre una sola masa igual a la suma de las masas de los dos bloques. En efecto, como las dos masas tienen igual aceleración, podemos considerarlas como un sistema único de masa $m_1 + m_2$.

Ejercicio (*a*) Determinar la aceleración y la fuerza de contacto si $m_1 = 2$ kg, $m_2 = 3$ kg y $F_A = 12$ N. (*b*) Determinar la fuerza de contacto para el caso en que los bloques se intercambian de modo que el primer bloque tiene una masa de 3 kg y el segundo bloque una masa de 2 kg. (*Respuestas* (*a*) $a_x = 2{,}4$ m/s^2, $F = 7{,}2$ N, (*b*) $F = 4{,}8$ N.)

Resumen

1 Las leyes del movimiento de Newton son leyes fundamentales de la naturaleza que constituyen la base de la mecánica.

2 La masa es una propiedad *intrínseca* de todo cuerpo.

3 La fuerza es una importante magnitud dinámica *derivada*.

TEMA	OBSERVACIONES Y ECUACIONES RELEVANTES
1. Leyes de Newton	
Primera ley	Un objeto en reposo permanece en reposo a menos que sobre él actúe una fuerza externa neta. Un objeto en movimiento continúa moviéndose con velocidad constante a menos que sobre él actúe una fuerza externa neta. (Los sistemas de referencia en los que esto ocurre se llaman sistemas de referencia inerciales.)
Segunda ley	El módulo de la aceleración es proporcional al módulo de la fuerza neta externa $\mathbf{F}_{neta}$, de acuerdo con $\mathbf{F}_{neta} = m\mathbf{a}$, donde m es la masa del objeto. La fuerza neta que actúa sobre un objeto, también denominada fuerza resultante, es la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre él: $\mathbf{F}_{neta} = \Sigma\mathbf{F}$. Así: $$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a} \qquad (4.1)$$
Tercera ley	Las fuerzas se dan siempre por pares, iguales y opuestas. Si el objeto A ejerce una fuerza sobre el objeto B, una fuerza igual y opuesta ejerce el objeto B sobre el A. $$\mathbf{F}_{A,B} = -\mathbf{F}_{B,A} \qquad (4.2)$$
2. Sistemas de referencia inerciales	Las leyes de Newton sólo son válidas en un sistema de referencia inercial, es decir un sistema de referencia para el cual un objeto en reposo permanece en reposo si no hay una fuerza neta que actúe sobre el objeto. Cualquier sistema de referencia que se mueva con velocidad constante relativa a un sistema de referencia inercial es también un sistema de referencia inercial. Un sistema de referencia que se mueve con aceleración relativa a un sistema inercial no es un sistema de referencia inercial. Un sistema de referencia ligado a la Tierra es aproximadamente un sistema de referencia inercial.
3. Fuerza, masa y peso	
Fuerza	La fuerza se define en función de la aceleración que produce a un determinado objeto. Una fuerza de 1 newton (N) es la fuerza que produce una aceleración de 1 m/s^2 sobre una masa de 1 kilogramo (kg).
Masa	La masa es la propiedad intrínseca de un objeto que mide su resistencia a la aceleración. La masa no depende de la localización del objeto. Las masas de dos objetos pueden compararse aplicando la misma fuerza a cada uno de los objetos y midiendo sus aceleraciones. La relación de las masas de los objetos es igual a la relación inversa de las aceleraciones producidas por la misma fuerza: $$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2} \qquad (4.3)$$
Peso	El peso $\mathbf{w}$ de un objeto es la fuerza de atracción gravitatoria ejercida por la Tierra sobre el objeto. Es proporcional a la masa m del objeto y a la intensidad del campo gravitatorio $\mathbf{g}$ o aceleración de la caída libre debida a la gravedad. $$\mathbf{w} = m\mathbf{g} \qquad (4.4)$$ El peso no es una propiedad intrínseca de un objeto; depende de la localización del objeto.

4. Fuerzas fundamentales	Todas las fuerzas observadas en la naturaleza pueden explicarse en función de cuatro interacciones fundamentales: **1** La fuerza gravitatoria. **2** La fuerza electromagnética. **3** La fuerza nuclear fuerte (llamada también fuerza hadrónica). **4** La fuerza nuclear débil.
5. Fuerzas de contacto	Las fuerzas de contacto de soporte y rozamiento y las ejercidas por muelles y cuerdas, son debidas a las fuerzas moleculares que surgen de la fuerza electromagnética básica.
Ley de Hooke	Cuando un muelle se comprime o se alarga en una pequeña cantidad Δx, la fuerza que ejerce es proporcional a Δx: $F_x = -k\,\Delta x$ (4.9)

Problemas

- ● Concepto simple, un solo paso, relativamente fácil.
- ●● Nivel intermedio, puede exigir síntesis de conceptos.
- ●●● Desafiante, para alumnos avanzados.
- SSM La solución se encuentra en el *Student Solutions Manual*.
- i Problemas que pueden encontrarse en el servicio iSOLVE de tareas para casa.
- i ✓ Estos problemas del servicio "Checkpoint" son problemas de control, que impulsan a los estudiantes a describir cómo se llega a la respuesta y a indicar su nivel de confianza.

En algunos problemas se dan más datos de los realmente necesarios; en otros pocos, deben extraerse algunos datos a partir de conocimientos generales, fuentes externas o estimaciones lógicas.

Usar en todos los problemas $g = 9{,}81$ m/s^2 para la aceleración de la gravedad y despreciar, a menos que se indique lo contrario, el rozamiento y la resistencia del aire.

Problemas conceptuales

1 ●● SSM ¿Cómo se puede saber si un sistema de referencia determinado es un sistema de referencia inercial?

2 ●● Suponga que usted observa un objeto desde un determinado sistema de referencia y encuentra que cuando sobre él no actúan fuerzas el cuerpo tiene una aceleración **a**. ¿Cómo puede usar esta información para encontrar un sistema de referencia inercial?

3 ● Si cuando se estudia un cuerpo desde un sistema de referencia inercial no se observa aceleración, ¿se puede concluir que sobre él no actúan fuerzas?

4 ● SSM Si sobre un objeto actúa una única fuerza distinta de cero, ¿debe tener una aceleración relativa a cualquier sistema de referencia inercial? ¿Puede tener incluso velocidad cero?

5 ● Si sobre un objeto actúa una única fuerza conocida, ¿puede decirse sin tener información adicional en qué dirección se moverá?

6 ● Se observa un objeto que se mueve a velocidad constante en un sistema de referencia inercial. Se concluye que (*a*) no actúan fuerzas sobre el objeto, (*b*) actúa una fuerza constante en la dirección del movimiento, (*c*) la fuerza neta que actúa sobre el objeto es cero, (*d*) la fuerza neta que actúa sobre el objeto es igual y opuesta a su peso.

7 ● Imagínese que un objeto se envía al espacio exterior, lejos de cualquier galaxia, estrella u otro objeto estelar. ¿Cómo cambiará su masa? ¿Y su peso?

8 ● SSM ¿Cómo podría un astronauta en una situación aparente de ingravidez ser consciente de su masa?

9 ● SSM ¿En qué circunstancias su peso aparente será mayor que su peso real?

10 ●● Explicar por qué se dice que según la primera y la segunda ley de Newton es imposible utilizar las leyes de la mecánica para saber si estamos quietos o moviéndonos a velocidad constante.

11 ● Supongamos que un bloque de masa m_1 descansa sobre otro bloque de masa m_2 y la combinación de ambos se apoya sobre una mesa, como se muestra en la figura 4.28. Encontrar la fuerza ejercida (*a*) por m_1 sobre m_2, (*b*) por m_2 sobre m_1, (*c*) por m_2 sobre la mesa, (*d*) por la mesa sobre m_2.

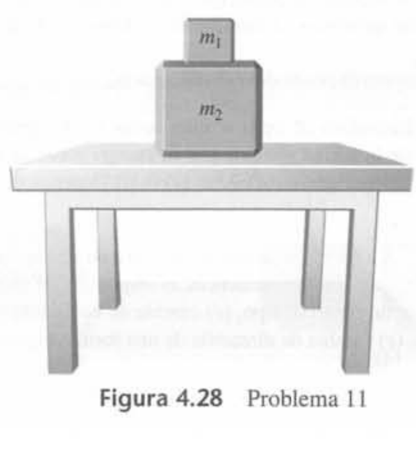


Figura 4.28 Problema 11

12 • SSM Verdadero o falso.

(*a*) Si dos fuerzas externas que son iguales en módulo y opuestas en dirección actúan sobre un mismo objeto, nunca serán fuerzas de acción-reacción.

(*b*) La acción es igual a la reacción sólo si los cuerpos no están acelerándose.

13 • Un hombre de 80 kg patina sobre el hielo empujando a un muchacho de 40 kg, también sobre patines, con una fuerza de 100 N. La fuerza ejercida por el muchacho sobre el hombre es de (*a*) 200 N, (*b*) 100 N, (*c*) 50 N, (*d*) 40 N.

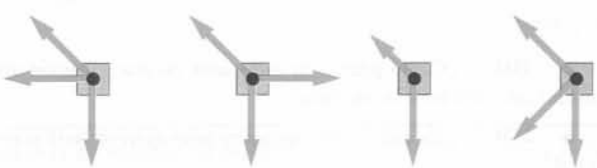
14 • Una muchacha sostiene un pájaro en su mano. La fuerza de reacción al peso del pájaro es (*a*) la fuerza gravitatoria de la Tierra sobre el pájaro, (*b*) la fuerza gravitatoria del pájaro sobre la Tierra, (*c*) la fuerza de contacto de la mano sobre el pájaro, (*d*) la fuerza de contacto del pájaro sobre la mano, (*e*) la fuerza gravitatoria de la Tierra sobre la mano.

15 • Un jugador de béisbol golpea la pelota con un bate. Si la fuerza con que éste golpea la pelota se considera como la fuerza de acción, ¿cuál es la fuerza de reacción? (*a*) La fuerza que el bate ejerce sobre las manos del bateador. (*b*) La fuerza sobre la pelota que ejerce el guante de la persona que consigue atraparla. (*c*) La fuerza que la pelota ejerce sobre el bate. (*d*) La fuerza que el lanzador ejerce sobre la bola mientras la lanza. (*e*) El rozamiento, ya que la pelota está en rotación hasta que se detiene.

16 • Considerar cualquier situación en la que se aplica una fuerza externa sobre un objeto, por ejemplo el empuje. Si la tercera ley de Newton requiere que *por cada acción haya una reacción igual y opuesta*, ¿por qué cada fuerza de reacción no anula siempre la fuerza aplicada, produciendo la inexistencia de una aceleración resultante?

17 • SSM Un cuerpo de 2,5 kg cuelga en reposo de una cuerda sujeta al techo. (*a*) Dibujar un diagrama que muestre las fuerzas que actúan sobre el cuerpo e indicar cada una de las fuerzas de reacción. (*b*) Hacer lo mismo con las fuerzas que actúan sobre la cuerda.

18 • ¿Cuál de los diagramas de fuerzas de la figura 4.29 representa un bloque que se desliza por una superficie inclinada sin rozamiento?



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

Figura 4.29 Problema 18

19 • Identificar cuál o cuáles de las frases siguientes son verdad o son falsas suponiendo que se está en un sistema de referencia inercial.

(*a*) Si no hay ninguna fuerza que actúa sobre un objeto, éste no se acelera.

(*b*) Si un objeto no se acelera, no puede haber fuerzas que actúen sobre él.

(*c*) El movimiento de un objeto va siempre en la dirección de la fuerza resultante.

(*d*) La masa de un objeto depende de su localización.

20 • Una paracaidista de peso w salta cerca de la superficie terrestre. ¿Cuál es el módulo de la fuerza ejercida por su cuerpo *sobre la Tierra*? (*a*) w. (*b*) Mayor que w, (*c*) Menor que w. (*d*) $9{,}8w$. (*e*) 0. (*f*) Depende de la resistencia del aire.

21 • SSM La fuerza neta que actúa sobre un objeto en movimiento bruscamente se hace cero. En consecuencia, el objeto (*a*) se para de repente, (*b*) se para al cabo de un cierto tiempo, (*c*) cambia de dirección, (*d*) continúa a velocidad constante, (*e*) cambia de dirección de una forma impredecible.

22 • Una cuerda de tender ropa se tensa y se sujeta por sus dos extremos. Se coloca una toalla húmeda en el centro de la cuerda. ¿Es posible que la cuerda permanezca horizontal? Razonar la respuesta.

23 • ¿Qué efecto produce la velocidad de un ascensor sobre el peso aparente de una persona en el ascensor?

Estimaciones y aproximaciones

24 •• Un coche que viaja a 90 km/h choca contra la parte trasera de un vehículo parado sin ocupantes. Afortunadamente el conductor llevaba puesto el cinturón de seguridad. Utilizando valores razonables para la masa del conductor y la distancia de frenado, estimar la fuerza (supuesta constante) ejercida por el cinturón sobre el conductor.

25 ••• SSM Haciendo las consideraciones necesarias, determinar la fuerza normal y la fuerza tangencial ejercida por la carretera sobre las ruedas de una bicicleta (*a*) cuando el ciclista asciende por una carretera de pendiente 8% a velocidad constante y (b) cuando desciende por la misma pendiente a velocidad constante. (Una pendiente del 8% significa que el ángulo de inclinación θ viene dado por tg $\theta = 0{,}08$.)

La primera y la segunda ley de Newton: Masa, inercia y fuerza

26 • Una partícula de masa m se mueve con una velocidad inicial $v_0 = 25{,}0$ m/s. Cuando una fuerza neta de 15,0 N actúa sobre ella, alcanza el reposo después de recorrer 62,5 m. ¿Cuál es el valor de m? (*a*) 37,5 kg. (*b*) 3,00 kg. (*c*) 1,50 kg. (*d*) 6,00 kg. (*e*) 3,75 kg.

27 • (*a*) Un objeto experimenta una aceleración de 3 m/s^2 cuando sobre él actúa una cierta fuerza F_0. ¿Cuál es su aceleración si la fuerza se duplica? (*b*) Un segundo objeto experimenta una aceleración de 9 m/s^2 bajo la influencia de la fuerza F_0. ¿Qué relación existe entre las masas de los dos objetos? (*c*) Si los dos objetos se atan juntos, ¿qué aceleración producirá la fuerza F_0?

28 • ISOLVE ✓ Un remolcador arrastra un buque con una fuerza constante F_1. El incremento en la velocidad del buque en un intervalo de 10 s es de 4 km/h. Cuando un segundo remolcador aplica un segunda fuerza constante F_2 en la misma dirección su velocidad crece en 16 km/h cada intervalo de 10 s. ¿Qué relación existe entre los módulos de las dos fuerzas? (Despreciar la resistencia del agua.)

29 •• SSM ISOLVE Una bala de $1{,}8 \times 10^{-3}$ kg de masa que lleva una velocidad de 500 m/s choca contra un gran bloque de madera y se introduce 6 cm en su interior antes de pararse. Suponer que la desaceleración de la bala es constante y calcular la fuerza ejercida por la madera sobre la bala.

30 •• SSM Una vagoneta de juguete está en una vía recta y horizontal y lleva un ventilador atado a uno de sus extremos. Se coloca la vagoneta en un extremo de la vía y se conecta el ventilador. La vagoneta, que estaba en reposo, empieza a moverse y en 4,55 s se ha movido 1,5 m. La masa de la vagoneta y del ventilador es de 355 g y suponemos que se mueve con aceleración constante. (*a*) ¿Cuál es la fuerza neta que se ejerce sobre la vagoneta? (*b*) Se van añadiendo pesos a la vagoneta hasta que tiene una masa de 722 g y se repite el experimento. ¿Cuánto le costará ahora a la vagoneta moverse los 1,5 m? Ignorar los efectos del rozamiento.

31 • Una fuerza F_0 produce una aceleración de 3 m/s^2 cuando actúa sobre un objeto de masa m que desliza sobre una superficie sin rozamiento. Hallar la aceleración del mismo objeto cuando se ve sometido a las fuerzas que se muestran en la figura 4.30*a* y *b*.

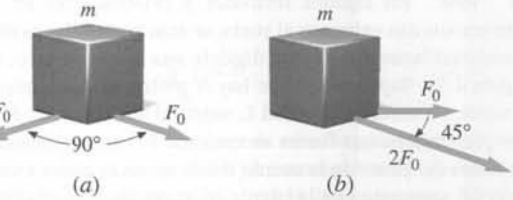


Figura 4.30 Problema 31

32 • ISOLVE Una fuerza $\mathbf{F} = (6\text{ N})\,\mathbf{i} - (3\text{ N})\,\mathbf{j}$ actúa sobre un cuerpo de masa 1,5 kg. Calcular la aceleración **a**. ¿Cuál es el módulo de *a*?

33 • Una sola fuerza de 12 N actúa sobre una partícula de masa *m*. La partícula parte del reposo y se mueve sobre una recta a lo largo de una distancia de 18 m en 6 s. Hallar su masa *m*.

34 • SSM Al y Bert están quietos en medio de un gran lago helado. Al empuja a Bert con una fuerza de 20 N durante 1,5 s. La masa de Bert es de 100 kg. (*a*) ¿Cuál es la velocidad a la que se mueve Bert después de ser empujado? (*b*) Si la masa de Al es de 80 kg, ¿qué velocidad alcanza? Considerar que no hay rozamiento.

35 • Si se empuja un bloque de masa m_1 con una fuerza horizontal determinada, éste adquiere una aceleración de 12 m/s^2. Si se empuja un bloque de masa m_2 con la misma fuerza, su aceleración es de 3 m/s^2. (*a*) ¿Qué aceleración proporcionaría la misma fuerza a un bloque de masa $m_2 - m_1$? (*b*) ¿Qué aceleración proporcionaría la misma fuerza a un bloque de masa $m_2 + m_1$? Considerar un movimiento sin rozamiento.

36 • Para arrastrar un tronco de 75 kg por el suelo con velocidad constante se le empuja con una fuerza de 250 N (horizontalmente). (*a*) ¿Cuál es la fuerza resistiva que ejerce el suelo? (*b*) ¿Qué fuerza deberemos ejercer si se desea dar al tronco una aceleración de 2 m/s^2?

37 • ISOLVE✓ Un objeto de 4 kg está sometido a la acción de dos fuerzas $\mathbf{F}_1 = (2\text{ N})\,\mathbf{i} - (3\text{ N})\,\mathbf{j}$ y $\mathbf{F}_2 = (4\text{ N})\,\mathbf{i} - (11\text{ N})\,\mathbf{j}$. El objeto está en reposo en el origen en el instante $t = 0$. (*a*) ¿Cuál es la aceleración del objeto? (*b*) ¿Cuál es su velocidad en el instante $t = 3$ s? (*c*) ¿Dónde está el objeto en el instante $t = 3$ s?

Peso y masa

38 • SSM En la Luna, la aceleración debida a la gravedad es sólo 1/6 de la que existe en la Tierra. Un astronauta cuyo peso en la Tierra es 600 N se desplaza a la superficie lunar. Su masa medida en la Luna será (*a*) 600 kg. (*b*) 100 kg. (*c*) 61,2 kg. (*d*) 9,81 kg. (*e*) 360 kg.

39 • ISOLVE Especificar el peso de una muchacha de 54 kg en (*a*) newtons y (*b*) libras.

40 • Determinar la masa de un hombre de 165 lb en kilogramos.

Fuerzas de contacto

41 • SSM ISOLVE✓ Un muelle vertical, cuya constante de fuerza vale 600 N/m está unido al techo por un extremo y a un bloque de 12 kg que descansa sobre una mesa horizontal por el otro, de modo que el muelle ejerce una fuerza hacia arriba sobre el bloque. El muelle se alarga 10 cm. (*a*) ¿Qué fuerza ejerce el muelle sobre el bloque? (*b*) ¿Qué fuerza ejerce la superficie sobre el bloque?

42 • Un bloque de 6 kg se desliza sobre una superficie horizontal sin rozamiento. Un muelle horizontal estira el bloque con una fuerza constante de 800 N/m. Si el muelle se alarga 4 cm desde su posición de equilibrio, ¿cuál es la aceleración del bloque?

Diagramas de fuerzas: equilibrio estático

43 • Un semáforo está colgado de un soporte tal como se muestra en la figura 4.31. ¿La tensión del cable más vertical es mayor o menor que la del otro cable?

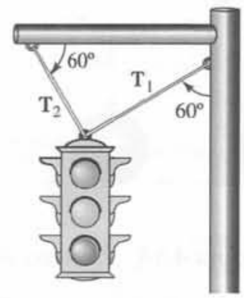


Figura 4.31 Problema 43

44 • ISOLVE Una lámpara de masa $m = 42,6$ kg cuelga de unos alambres como indica la figura 4.32. El anillo tiene masa despreciable. La tensión T_1 en el alambre vertical es (*a*) 209 N, (*b*) 418 N, (*c*) 570 N, (*d*) 360 N, (*e*) 730 N.

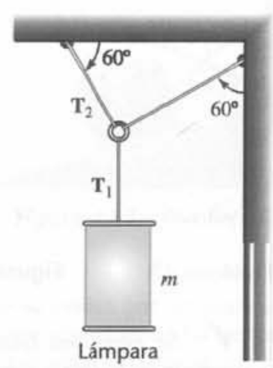


Figura 4.32 Problema 44

45 •• SSM ISOLVE✓ En la figura 4.33*a* se muestra un bloque de 0,500 kg que cuelga de una cuerda. Los extremos de la cuerda están sujetos al techo en unos puntos separados 1,00 m. (*a*) ¿Qué ángulo forma la cuerda con el techo? (*b*) ¿Cuál es la tensión de la cuerda? (*c*) Se quita el bloque de 0,500 kg y se cuelgan dos bloques de 0,250 kg cada uno de forma que la longitud de los tres tramos de cuerda es la misma, tal como se ve en la figura 4.33*b*. ¿Cuál es la tensión en cada segmento de la cuerda?

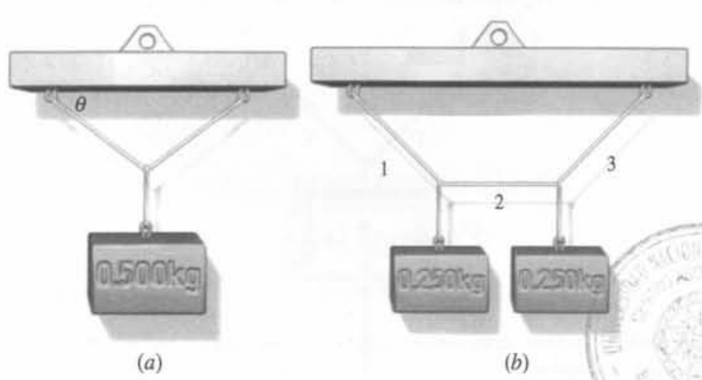


Figura 4.33 Problema 45

46 • Un objeto de 100 N se cuelga de unas cuerdas tal como se muestra en la figura 4.34. ¿Cuál es la tensión de la cuerda horizontal?

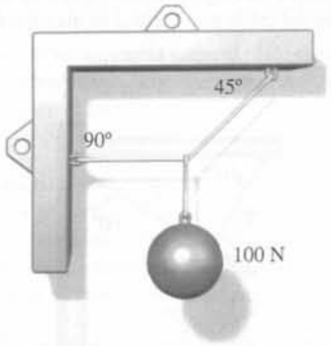


Figura 4.34 Problema 46

47 • Un objeto de 10 kg sobre una mesa sin rozamiento está sometido a dos fuerzas horizontales $\mathbf{F}_1$ y $\mathbf{F}_2$ de módulo $F_1 = 20$ N y $F_2 = 30$ N, como se indica en la figura 4.35. (*a*) Determinar la aceleración **a** del objeto. (*b*) Una tercera fuerza $\mathbf{F}_3$ se aplica para que el objeto se encuentre en equilibrio estático. Determinar $\mathbf{F}_3$.

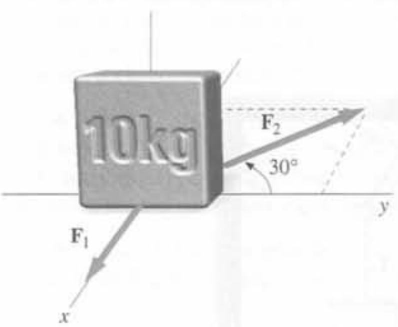


Figura 4.35 Problema 47

Figura 4.36 Problema 48

48 • SSM ✓ Se ejerce una fuerza vertical **T** sobre un cuerpo de 5 kg cerca de la superficie de la Tierra, como indica la figura 4.36. Determinar la aceleración del cuerpo si (*a*) $T = 5$ N, (*b*) $T = 10$ N y (*c*) $T = 100$ N.

49 •• Un cuadro que pesa 2 kg cuelga de dos cables de igual longitud que forman un ángulo θ con la horizontal como indica la figura 4.37. (*a*) Determinar la tensión T en función de θ y del peso w del cuadro. ¿Para qué ángulo θ es T mínimo? ¿Y máximo? (*b*) Si $\theta = 30°$, determinar la tensión de los cables.

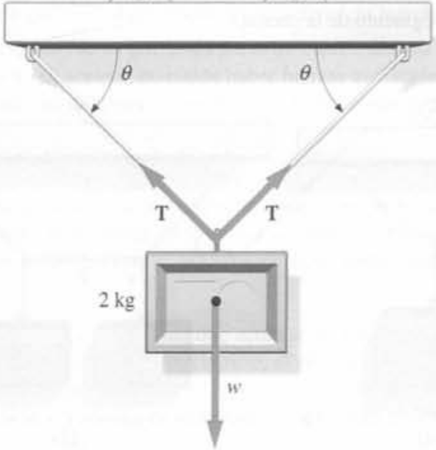
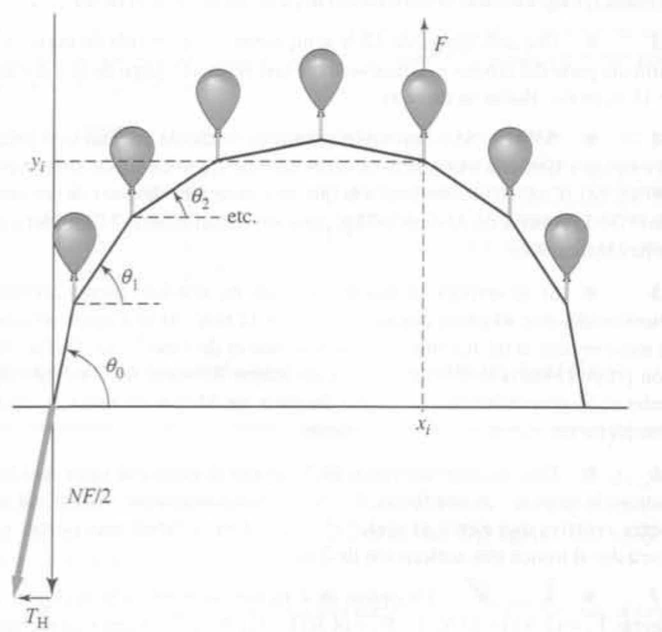
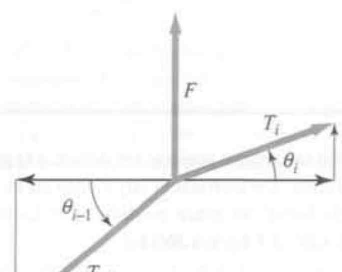


Figura 4.37 Problema 49

50 ••• SSM En algunos festivales y celebraciones en una cuerda larga, sujeta por sus dos extremos al suelo, se atan globos llenos de helio cuya fuerza ascensional levanta la cuerda dándole una forma de arco, tal como se ve en la figura 4.38. Supongamos que hay N globos atados a intervalos iguales a una cuerda sin masa de longitud L, sujeta al suelo por sus dos extremos. Cada globo proporciona una fuerza ascensional F. Las coordenadas horizontales y verticales del punto de la cuerda donde se ata el globo i son x_i e y_i y T_i es la tensión del segmento i de la cuerda (el segmento 0 es el segmento entre el punto de sujeción al suelo y el primer globo y el segmento N corresponde al trozo de cuerda que une el globo N con el otro extremo al que está sujeta la cuerda)



(*a*)



(*b*)

Figura 4.38 Problema 50

(a) La figura 4.38*b* muestra el diagrama de fuerzas en el globo i. A partir de este diagrama demostrar que la componente horizontal de la fuerza T_i (denominada T_H) es la misma para todos los globos, y que considerando la componente vertical de la fuerza se puede derivar la ecuación siguiente, que relaciona la tensión de los segmentos i e $i-1$

$$T_{i-1} \text{ sen } \theta_{i-1} - T_i \text{ sen } \theta_i = F$$

(b) Demostrar que $\text{tg } \theta_0 = -\text{tg } \theta_{N+1} = NF/2T_H$

(c) A partir del diagrama y de las dos expresiones anteriores, demostrar que

$$\text{tg}\,\theta_i = (N - 2i)F/2T_H$$

y que

$$x_i = \frac{L}{N+1}\sum_{j=0}^{i-1}\cos\theta_j, \quad y_i = \frac{L}{N+1}\sum_{j=0}^{i-1}\operatorname{sen}\theta_j$$

(d) Escribir un programa con una hoja de cálculo que dibuje la forma del arco teniendo en cuenta los siguientes parámetros: $N = 10$ globos; cada uno de los globos proporciona una fuerza de 1 N; la cuerda tiene 10 m de longitud y la componente horizontal de la tensión es $T_H = 10$ N. ¿A qué distancia están los puntos de sujeción con el suelo? ¿Cuál es la máxima altura del arco?

(e) Obsérvese que no hemos indicado cuál es la separación entre los puntos de sujeción de la cuerda, ya que esta distancia viene determinada por otros parámetros. Variar T_H manteniendo fijos los otros parámetros hasta que pueda crear un arco cuyas sujeciones estén separadas 8 m. ¿Qué valor tiene T_H? A medida que T_H aumenta, el arco se hace más plano. ¿El modelo con la hoja de cálculo reproduce este comportamiento?

51 ●● Una grúa sostiene un peso de 1 tonelada (1000 kg). Calcular la tensión del cable que lo soporta si (*a*) el peso es acelerado hacia arriba a 2 m/s², (*b*) se levanta el peso con velocidad constante, (*c*) el peso es levantado con una velocidad que disminuye 2 m/s en cada segundo.

52 ●● ISOLVE Determinar las tensiones y las masas desconocidas de los sistemas en equilibrio que se representan en la figura 4.39.

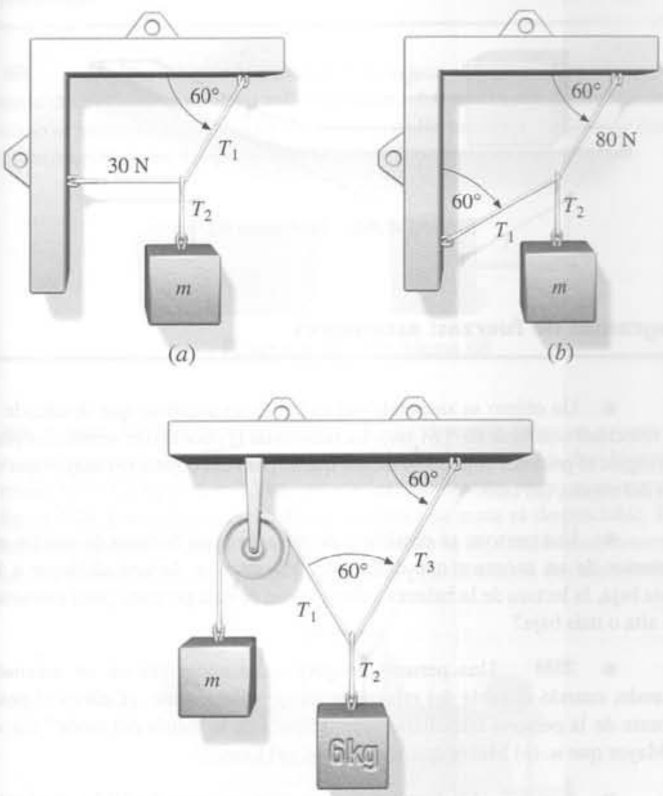


Figura 4.39 Problema 52

53 ●● ISOLVE ✓ Un coche está estancado en terreno blando. El conductor está solo pero dispone de una cuerda larga y fuerte. El conductor, que ha estudiado física, ata la cuerda tensa a un poste telefónico y tira de ella lateralmente como indica la figura 4.40. (*a*) Determinar la fuerza ejercida por la cuerda sobre el coche cuando el ángulo θ es 3° y el conductor tira con una fuerza de 400 N, pero el coche no se mueve. (*b*) ¿Qué resistencia debería tener la cuerda si se necesitara una fuerza de 600 N bajo un ángulo de $\theta = 4°$ para mover el coche?

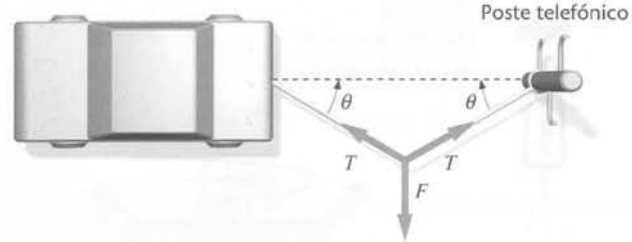


Figura 4.40 Problema 53

Diagramas de fuerzas: Planos inclinados y fuerza normal

54 ● SSM ISOLVE Una caja grande de 20 kg de masa está en reposo sobre una superficie sin rozamiento. Si se tira de la caja con una fuerza de 250 N con un ángulo de 35° por debajo de la horizontal, ¿cuál es la aceleración de la caja en la dirección de la superficie?

55 ● ISOLVE La caja del problema 54 está situada ahora en una rampa inclinada 15° sobre una superficie sin rozamiento. Se tira de la caja con una fuerza que forma un ángulo de 40° con la horizontal (véase la figura 4.41), ¿cuál es el menor valor de la fuerza que hace que la caja suba por la rampa?

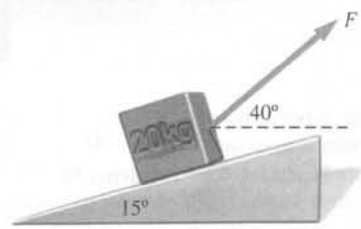


Figura 4.41 Problema 55

56 ● Un bloque se desliza por un plano inclinado sin rozamiento. Dibujar un diagrama donde se representen las fuerzas que actúan sobre el bloque. Indicar para cada fuerza del diagrama la correspondiente fuerza de reacción.

57 ● El sistema representado en la figura 4.42 se encuentra en equilibrio. El valor de la masa *m* es: (*a*) 3,5 kg, (*b*) 3,5 sen 40° kg, (*c*) 3,5 tg 40° kg, (*d*) ninguno de los anteriores.

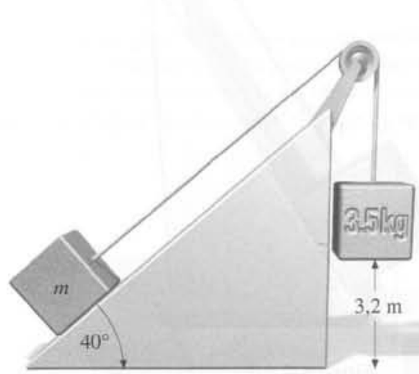


Figura 4.42 Problema 57

58 ● SSM En la figura 4.43, los objetos están sujetos a dinamómetros calibrados en newtons. Dar las lecturas de los dinamómetros en cada caso, suponiendo que las cuerdas carecen de masa

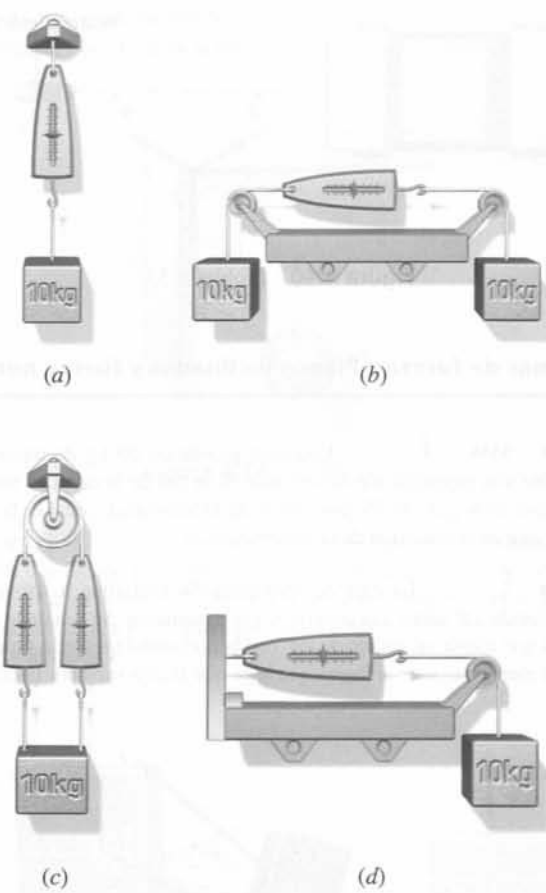


Figura 4.43 Problema 58

59 ●● Un cuerpo se mantiene en posición mediante un cable a lo largo de un plano inclinado pulido (figura 4.44). (*a*) Si $\theta = 60°$ y $m = 50$ kg, determinar la tensión del cable y la fuerza normal ejercida por el plano inclinado. (*b*) Determinar la tensión en función de θ y m y comprobar el resultado para $\theta = 0$ y $\theta = 90°$.

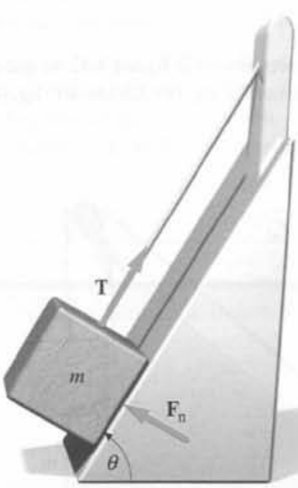


Figura 4.44 Problema 59

60 ●● Una fuerza horizontal de 100 N actúa sobre un bloque de 12 kg haciéndole subir por un plano inclinado sin rozamiento, que forma un ángulo de 25° con la horizontal. (*a*) ¿Cuál es la fuerza normal que el plano inclinado ejerce sobre el bloque? (*b*) ¿Cuál es la aceleración del bloque?

61 ●● SSM iSOLVE Un estudiante de 65 kg se pesa subiéndose a una balanza que está dispuesta sobre un monopatín con ruedas, que baja por un plano inclinado (figura 4.45). Suponer que no hay rozamiento y que la fuerza ejercida por el plano inclinado sobre el monopatín es perpendicular al plano inclinado. ¿Cuál es la lectura de la balanza si $\theta = 30°$?

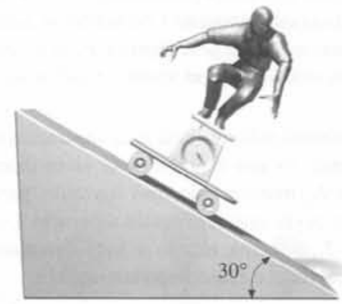


Figura 4.45 Problema 61

62 ●● Un objeto de masa m resbala por una superficie sin rozamiento que acaba con una rampa con una inclinación θ respecto la horizontal (véase la figura 4.46). La velocidad inicial del objeto es v_0. Cuando el objeto alcanza la rampa sube hasta una altura h antes de bajar de nuevo. Demostrar que h es independiente de θ.

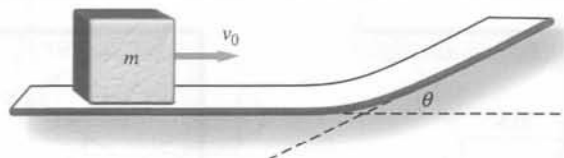


Figura 4.46 Problema 62

Diagramas de fuerzas: ascensores

63 ● Un objeto se suspende del techo de un ascensor que desciende a una velocidad constante de 9,81 m/s. La tensión de la cuerda que sujeta al objeto es (*a*) igual al peso del objeto, (*b*) menor que el peso del objeto, (*c*) mayor que el peso del objeto, (*d*) cero.

64 ● Una persona se encuentra de pie sobre una balanza de muelle en el interior de un ascensor que desciende. Mientras se detiene al llegar a la planta baja, la lectura de la balanza sobre el peso de esta persona ¿será correcta, más alta o más baja?

65 ● SSM Una persona de peso w se encuentra en un ascensor subiendo, cuando el cable del mismo se rompe súbitamente. ¿Cuál es el peso aparente de la persona inmediatamente después de la rotura del cable? (*a*) w. (*b*) Mayor que w. (*c*) Menor que w. (*d*) $9{,}8w$. (*e*) Cero.

66 ● iSOLVE Un hombre que sostiene un peso de 10 kg mediante una cuerda capaz de resistir 150 N sube en un ascensor. Cuando el ascensor arranca, la cuerda se rompe. ¿Cuál fue la aceleración mínima del ascensor?

67 ●● Un cuerpo de 2 kg cuelga de un dinamómetro (calibrado en newtons) sujeto al techo de un ascensor (figura 4.47). Determinar la lectura que indicará el dinamómetro (*a*) cuando el ascensor se mueve hacia arriba con velocidad constante de 30 m/s, (*b*) cuando el ascensor desciende con velocidad constante de 30 m/s, (*c*) cuando el ascensor sube a 20 m/s y acelera hacia arriba a 10 m/s². (*d*) De $t = 0$ a $t = 5$ s, el ascensor se mueve hacia arriba a 10 m/s. Su velocidad se reduce entonces uniformemente a cero en los siguientes 4 segundos, de modo que queda en reposo para $t = 9$ s. Describir la lectura del dinamómetro durante el intervalo $0 < t < 9$ s.

Figura 4.47 Problema 67

Diagramas de fuerzas: Cuerdas, tensión y la tercera ley de Newton

68 • Dos bloques de masas m_1 y m_2 conectados entre sí por una cuerda de masa despreciable se aceleran uniformemente sobre una superficie sin rozamiento, como se indica en la figura 4.48. La relación de las tensiones T_1/T_2 viene dada por (*a*) m_1/m_2, (*b*) m_2/m_1, (*c*) $(m_1 + m_2)/m_2$, (*d*) $m_1/(m_1 + m_2)$, (*e*) $m_2/(m_1 + m_2)$.

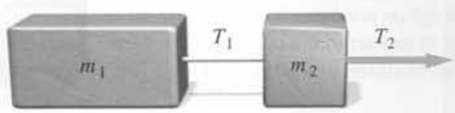


Figura 4.48 Problema 68

69 •• Un bloque de masa m_2 = 3,5 kg descansa sobre un estante horizontal sin rozamiento y está conectado mediante cuerdas a dos bloques de masas m_1 = 1,5 kg y m_3 = 2,5 kg, que cuelgan libremente, como se muestra en la figura 4.49. Las poleas carecen de rozamiento y su masa es despreciable. El sistema se mantiene inicialmente en reposo. Cuando se deja en libertad, determinar, (*a*) la aceleración de cada uno de los bloques, y (*b*) la tensión de cada cuerda.

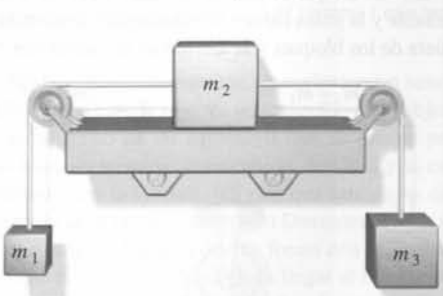


Figura 4.49 Problema 69

70 •• SSM Dos bloques están en contacto sobre una superficie horizontal sin rozamiento. Una fuerza **F** horizontal se aplica a uno de ellos como muestra la figura 4.50 y ambos son acelerados. Determinar la aceleración y la fuerza de contacto para (*a*) los valores generales de F, m_1 y m_2 y (*b*) para F = 3,2 N, m_1 = 2 kg y m_2 = 6 kg.

Figura 4.50 Problemas 70 y 71

71 •• Repetir el problema anterior, intercambiando la posición de los dos bloques.

72 •• iSOLVE ✓ Dos bloques de 100 kg son arrastrados a lo largo de una superficie sin rozamiento con una aceleración constante de 1,0 m/s^2, como se indica en la figura 4.51. Cada cuerda tiene una masa de 1 kg. Determinar la fuerza F y la tensión de las cuerdas en los puntos A, B y C.

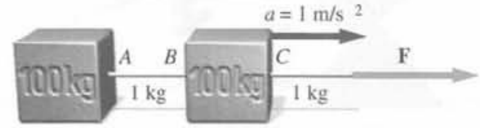


Figura 4.51 Problema 72

73 •• Se sube un objeto de masa m con una cuerda de masa M y de longitud L sujeta desde uno de sus extremos. La cuerda y el objeto se aceleran en la dirección vertical con aceleración a. La distribución de la masa en la cuerda es uniforme. Demostrar que la tensión en la cuerda a una distancia x (< L) por encima del bloque es $(a + g)[m + (x/L)M]$.

74 •• SSM iSOLVE Una cadena consiste de 5 eslabones, cada uno con una masa de 0,1 kg. Se sube la cadena verticalmente con una aceleración de 2,5 m/s^2. La cadena se sujeta desde el eslabón superior y ningún punto de la cadena toca con el suelo. Encontrar (*a*) la fuerza F ejercida en el extremo superior de la cadena, (*b*) la fuerza neta en cada eslabón y (*c*) la fuerza que cada eslabón ejerce sobre el eslabón inmediatamente inferior.

75 • Un objeto de 40,0 kg suspendido de una cuerda vertical está inicialmente en reposo. El objeto se acelera entonces hacia arriba. La tensión en la cuerda necesaria para que el objeto alcance una velocidad hacia arriba de 3,5 m/s en 0,700 s es (*a*) 590 N, (*b*) 390 N, (*c*) 200 N, (*d*) 980 N, (*e*) 720 N.

76 • iSOLVE ✓ Un helicóptero suspendido en el aire en el mismo lugar y de masa m_h está descargando un camión de masa m_c. Si la velocidad de descenso del camión se incrementa a razón de $0{,}1g$, ¿cuál es la tensión del cable que le soporta? (*a*) $1{,}1m_c\,g$. (*b*) $m_c\,g$. (*c*) $0{,}9m_c\,g$. (*d*) $1{,}1(m_h + m_c)g$. (*e*) $0{,}9(m_h + m_c)g$.

77 •• Dos objetos están conectados por una cuerda de masa despreciable, como se indica en la figura 4.52. El plano inclinado y la polea carecen de rozamiento. Determinar la aceleración de los objetos y la tensión de la cuerda para (*a*) valores generales de θ, m_1 y m_2 y (*b*) θ = 30° y m_1 = m_2 = 5 kg.

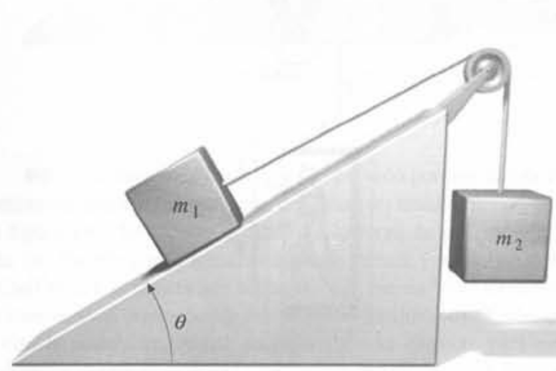


Figura 4.52 Problema 77

78 ● En una representación escénica del cuento de Peter Pan, la actriz que hace el papel de Peter y pesa 50 kg ha de "volar" verticalmente de forma que para coincidir con el fondo musical debe bajar una distancia de 3,2 m en 2,2 s. Entre bastidores, una superficie pulida, inclinada 50°, soporta un contrapeso de masa m, como indica la figura 4.53. Indicar los cálculos que debe realizar el director de escena para determinar (*a*) la masa del contrapeso que debe utilizarse y (*b*) la tensión del cable.

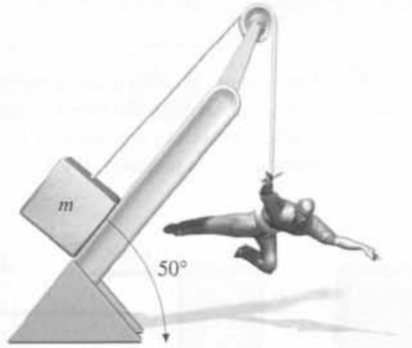


Figura 4.53 Problema 78

79 ●● Un bloque de 8 kg y otro de 10 kg conectados por una cuerda que pasa por una polea sin rozamiento, deslizan por planos inclinados sin rozamiento como indica la figura 4.54. (*a*) Determinar la aceleración de los bloques y la tensión de la cuerda. (*b*) Los dos bloques se reemplazan por otros de masas m_1 y m_2, de tal modo que no se produce aceleración. Determinar toda la información posible sobre las masas de estos dos nuevos bloques.

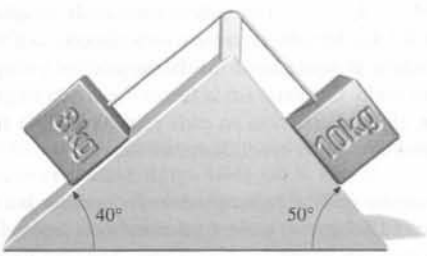


Figura 4.54 Problema 79

80 ●● Una cuerda pesada de longitud 5 m y masa 4 kg se encuentra sobre una mesa horizontal sin rozamiento. Un extremo se conecta a un bloque de 6 kg. En el otro extremo de la cuerda se aplica una fuerza horizontal constante de 100 N. (*a*) ¿Cuál es la aceleración del sistema? (*b*) Expresar la tensión de la cuerda en función de su posición a lo largo de ésta.

81 ●● SSM Una pintora de 60 kg está de pie sobre un montacargas de aluminio de 15 kg. El montacargas está sujeto por una cuerda que pasa por una polea situada en lo alto de la casa, lo que le permite elevarse a sí misma y a la plataforma (figura 4.55). (*a*) ¿Con qué fuerza debe tirar de la cuerda para que el conjunto ascienda con una aceleración de 0,8 m/s^2? (*b*) Cuando su velocidad alcanza el valor de 1 m/s, tira de la cuerda de modo que ella y su montacargas ascienda a velocidad constante. ¿Qué fuerza ejerce entonces la cuerda? (Ignorar la masa de la cuerda.)

Figura 4.55 Problema 81

82 ●●● La figura 4.56 muestra un bloque de 20 kg que desliza sobre otro de 10 kg. Todas las superficies se consideran sin rozamiento. Determinar la aceleración de cada bloque y la tensión en la cuerda que los conecta.

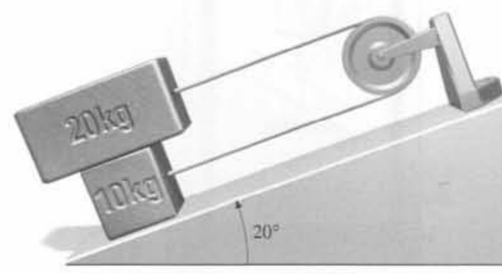


Figura 4.56 Problema 82

83 ●●● ✓ Un bloque de 20 kg dotado de una polea se desliza a lo largo de una superficie sin rozamiento. Está conectado mediante una cuerda a un bloque de 5 kg según el dispositivo que se muestra en la figura 4.57. Determinar la aceleración de cada uno de los bloques y la tensión de la cuerda.

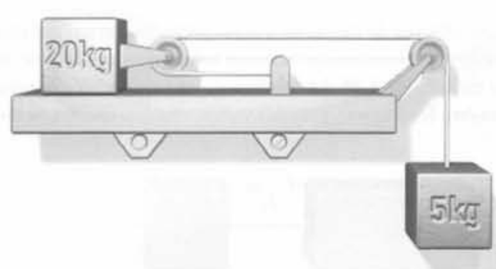


Figura 4.57 Problema 83

Diagrama de fuerzas: máquina de Atwood

84 ●● SSM El aparato de la figura 4.58 se denomina *máquina de Atwood* y se utiliza para medir la aceleración debida a la gravedad g a partir de la aceleración de los dos bloques. Suponiendo que la cuerda y la polea tienen una masa despreciable y la polea carece de rozamiento, demostrar que la aceleración de cualquiera de los bloques y la tensión de la cuerda son

$$a = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}g \qquad \text{y} \qquad T = \frac{2m_1m_2g}{m_1 + m_2}$$

Figura 4.58 Problemas 84-87