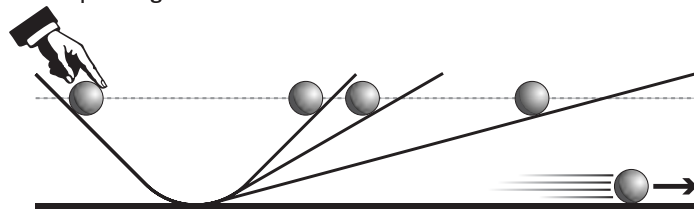


Principio de inercia

Durante siglos persistió la concepción aristotélica según la cual el estado natural de un cuerpo es el reposo. Según esta formulación un cuerpo en movimiento se detiene cuando la fuerza que lo empuja deja de actuar.

A principios del siglo XVII Galileo Galilei, discutiendo sobre el movimiento, contrapuso una novedosa idea: un cuerpo puede moverse sin que ninguna influencia ejercida por algo o alguien actúe sobre él. Según Galileo un cuerpo en movimiento y libre de fuerzas se mueve con movimiento rectilíneo y uniforme, es decir con velocidad constante en módulo y dirección.

Para probarlo ideó un célebre experimento utilizando dos planos inclinados en la disposición que se esquematiza en la figura. Dejó deslizar una pelota desde cierta altura inicial por uno de los planos y observó que, si las superficies eran muy lisas el cuerpo llegaba prácticamente hasta la misma altura en el segundo plano. Cuánto menor era el ángulo del segundo plano, mayor era la distancia recorrida hasta alcanzar la misma altura. Extrapolando llegó a la conclusión que si el plano fuese horizontal, la pelota se movería indefinidamente a menos que alguna interacción con el entorno la frenase.



Galileo concluyó que un cuerpo que no interactúa con otros mantiene su estado de movimiento; a esta tendencia la llamó **inercia**. Que no modifique su estado de movimiento significa que su vector velocidad permanece constante. En particular, si está en reposo respecto de un sistema de referencia dado, continuará en reposo (mantiene su velocidad nula). En cambio si está en movimiento continuará con movimiento rectilíneo y uniforme (M.R.U.)

En el espacio interestelar podemos hablar de un cuerpo aislado, sin influencia apreciable de su entorno, sin que sobre él actúe ninguna fuerza. Pero no necesitamos ir al espacio distante para experimentar la inercia porque no hay distinción entre un cuerpo sobre el cual no actúa ninguna fuerza y un cuerpo sobre el cual la suma de todas las fuerzas llamada **resultante** o **fuerza neta** sea cero*.

Isaac Newton resumió las observaciones de Galileo y formuló en 1687 la **primera ley del movimiento** conocida como el **principio de inercia** de la siguiente manera:

Considérese un cuerpo puntual sobre el que no actúan fuerzas o sobre el cual de las acciones externas resulta una fuerza neta nula. Si el cuerpo está en reposo, permanecerá en reposo. Si el cuerpo está moviéndose, continuará en línea recta con velocidad constante.

Una consecuencia muy importante de esta formulación es que torna equivalentes el M.R.U. y el reposo. Con el principio de inercia, se acaba con la noción de un movimiento o un reposo absolutos pues ambos son estados posibles en cuerpos libres de fuerzas. Los sistemas de referencia que se mueven unos con respecto a otros a velocidad constante, son equivalentes para la física (sistemas inerciales).

*Por el momento trataremos sólo con cuerpos puntuales o con cuerpos extensos en los que se pueda considerar que todas las fuerzas que actúan sobre ellos concurren en un punto.

Un cambio del vector velocidad del cuerpo revela que existe interacción con otro u otros cuerpos. Diremos en este caso que la fuerza neta sobre el cuerpo no es nula. Por el otro lado cuando el cuerpo está en reposo o se mueve con movimiento rectilíneo uniforme, necesariamente estará libre de interacciones o sujeto a varias interacciones cuya acción resultante es nula.

Esta ley parece ir contra el sentido común ya que experimentamos cotidianamente que un cuerpo deslizando por el piso, si no lo empujamos, acaba por detenerse. Hoy sabemos que esto se debe a la presencia inevitable del rozamiento: aunque no lo parezca el cuerpo está sometido a la fricción que lo detiene. La dificultad de entender el papel del rozamiento veló la idea de inercia y retrasó el nacimiento de la dinámica durante varios siglos. Si lográramos disminuir la fricción el principio de inercia se haría evidente como en las mesas de tejo de los salones de juego. En este juego se mantienen separadas las superficies del tejo y la mesa mediante la aplicación de aire comprimido a través de pequeños agujeros de manera que no existe rozamiento porque no hay contacto.



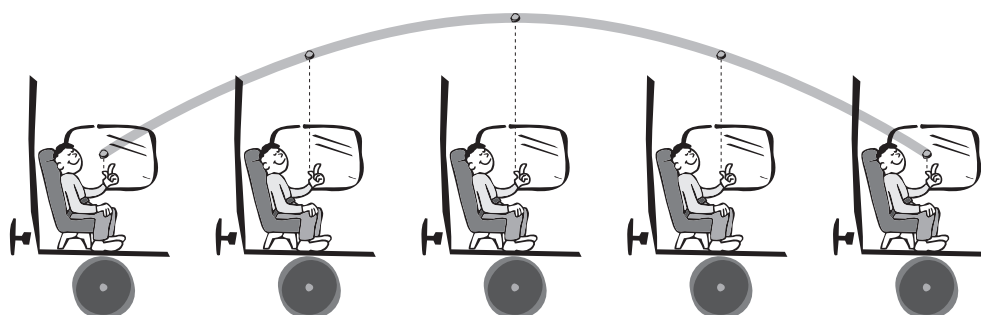
En las mesas de tejo de los salones de juego el principio de inercia se hace evidente.

Mediante el principio de inercia, podemos explicar muchos fenómenos:

Si viajamos en un vehículo que frena bruscamente, los objetos que no estén del todo fijos al auto, saldrán despedidos hacia delante. Vistos desde Tierra, estos objetos no hacen más que conservar el movimiento que traían.



Si viajamos en un tren que marcha a velocidad constante, y sentados en nuestro asiento tiramos una moneda hacia arriba, vuelve a caer en nuestras manos. Vista desde la Tierra, la moneda describe un arco de parábola, con velocidad inicial horizontal igual a la del tren. Esto se debe a la inercia de movimiento de la moneda, que comparte el movimiento de avance con el tren.



El argumento de la torre. Este argumento, históricamente utilizado en contra de la posibilidad del movimiento de la Tierra, plantea el siguiente interrogante: ¿por qué una piedra dejada caer desde lo alto de una torre llega al suelo al pie de la misma? Si mientras la piedra estuvo cayendo, la Tierra y la torre se desplazaron hacia el este, entonces la piedra debería tocar el piso al oeste del pie de la torre. ¡Pareciera que la observación nos indicara que la Tierra está en reposo!

Actividad. Explique cómo, a la luz del pensamiento de Galileo, este argumento pierde validez como objeción en contra del movimiento terrestre.

Principio de masa

Hemos dicho que la fuerza, o más precisamente la fuerza neta, refleja la acción del entorno sobre un cuerpo puntual y se manifiesta porque el cuerpo cambia su estado de movimiento, es decir, se modifica el vector velocidad.

Dado que este cambio se expresa, como se ha visto en cinemática, mediante el vector aceleración, es adecuado definir la fuerza neta sobre un cuerpo como directamente proporcional a la aceleración. Mejor dicho debe ser proporcional al vector aceleración (no basta que lo sea al módulo), pues la experiencia muestra que la fuerza tiene la misma dirección y sentido que la aceleración.

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

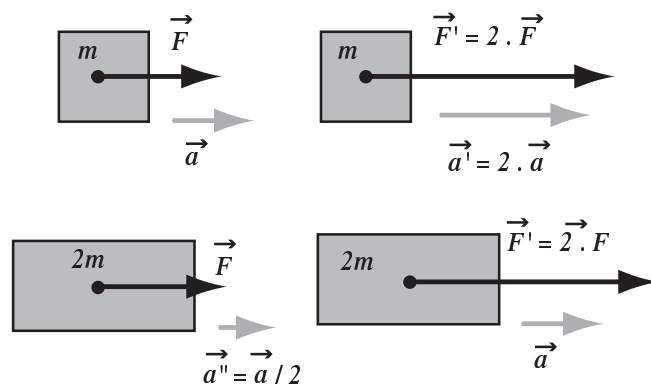
Podríamos igualar la fuerza neta directamente a la aceleración, pero eso significaría que la acción que se debe ejercer para acelerar un cuerpo es independiente del mismo. Este hecho es contrario a la experiencia porque se observa, por ejemplo, que para acelerar un bloque pequeño de madera se debe ejercer una fuerza menor que para producir la misma aceleración en un bloque grande del mismo material.

La constante de proporcionalidad entre la fuerza neta y la aceleración depende del cuerpo y está relacionada con su cantidad de materia. Es una magnitud escalar que se llama **masa inercial**.

Ante una misma fuerza neta, la aceleración de un objeto (puntual o que se mueve como un todo) es inversamente proporcional a su masa. Esta definición completa el segundo principio o segunda ley de Newton que se expresa en símbolos así:

$$\vec{F}_{neta} = m \cdot \vec{a}$$

Donde **m** indica la masa inercial.



Fuerzas de contacto



Las fuerzas sobre una partícula provienen de su entorno, y pueden ser de contacto o bien ejercer su acción a distancia. Cuando empujamos un carro o atajamos una pelota estamos aplicando al cuerpo fuerzas de contacto. También existen fuerzas sobre un cuerpo que se ejercen desde otro u otros que están alejados. Por ejemplo la atracción gravitatoria de la Tierra sobre un satélite o la atracción magnética de un imán sobre un clavo.



Fuerzas ejercidas a distancia

Hemos llamado fuerza neta a la que determina la aceleración del cuerpo. En el caso de una única fuerza es trivial que ésta es la fuerza neta. Si sobre un cuerpo actúan simultáneamente varias fuerzas, se verifica experimentalmente que la **fuerza neta o resultante** es la suma vectorial de todas las fuerzas aplicadas. Este importante hecho se llama principio de superposición de las fuerzas.

$$\vec{F}_{neta} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

donde n es la cantidad de fuerzas que actúan sobre el cuerpo puntual.

El segundo principio de Newton es por lo tanto una ecuación vectorial que establece que:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m \cdot \vec{a}$$

La **segunda ley del movimiento** conocida como el **principio de masa** se puede enunciar de la siguiente manera:

La aceleración de un cuerpo puntual es directamente proporcional a la resultante de las fuerzas que actúan sobre él e inversamente proporcional a su masa. La resultante y la aceleración tienen igual dirección y sentido.

En lo que sigue trataremos con fuerzas coplanares. El método analítico de sumar vectores consiste en elegir un sistema de ejes, tomar las proyecciones de cada vector en ese sistema de ejes cartesianos y así obtener dos ecuaciones escalares en los ejes x e y :

$$\sum F_x = m \cdot a_x$$

$$\sum F_y = m \cdot a_y$$

A partir del segundo principio o segunda ley de Newton, si se conocen las fuerzas que actúan en cualquier instante de tiempo, se puede determinar la aceleración. Conocida la aceleración se pueden determinar matemáticamente la velocidad y la posición del cuerpo en función del tiempo, es decir que se pueden deducir las ecuaciones horarias. En un caso general encontrarlas requiere del análisis matemático, que justamente fue desarrollado por Newton para resolver este problema.

Si la fuerza neta o resultante es cero, estamos en las condiciones del principio de inercia,

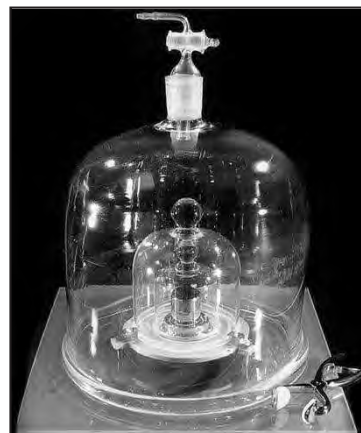
$$\sum F = 0 \Rightarrow a = 0 \Rightarrow \vec{v} = \text{constante (incluye } v \text{ nula constante, el reposo)}$$

Es conveniente aclarar que el principio de inercia no es un caso particular del segundo principio sino que establece cuándo es válida la segunda ley, esto es, define un sistema de referencia inercial. Ambas leyes son necesarias.

En el SIMELA la masa es una magnitud fundamental. Ligada a la cantidad de materia, se mide en referencia a una unidad patrón. La unidad de masa es el **kilogramo masa** que corresponde a la masa de un prototipo de platino e iridio conservado en Sévres, Francia.

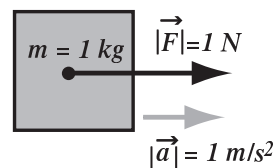
En el SIMELA la fuerza es una magnitud derivada y su unidad se determina a partir de las unidades de aceleración y de masa. La unidad de fuerza queda expresada en **kg · m / s²** y se llama **Newton (N)**. Entonces 1 N es la fuerza necesaria para producir una aceleración de 1 m/s² a un cuerpo cuya masa es 1 kg.

En el sistema cgs se usan las unidades centímetro, gramo y segundo para medir longitudes, masas y tiempos respectivamente y la unidad de fuerza es g · cm / s² llamada dina.



Kilogramo patrón. Se definió conceptualmente como la masa de un litro de agua a 4 °C y una atmósfera de presión, y se construyó un prototipo en platino y un 10% de Iridio que se guardó junto con el del metro en el Bureau International des Poids et Mesures, en Paris. Los países adheridos a la Convención Internacional del Metro recibieron dos copias de cada patrón, de igual forma y material. El prototipo de metro es una barra con dos finas marcas que señalan esa distancia, y el de kilogramo masa es un cilindro de 39 mm de altura y de diámetro, con los cantos romos.

Este metro patrón tiene un valor puramente histórico, puesto que en 1960 se definió el metro como 1.650.763,73 veces la longitud de onda de la radiación roja anaranjada (transición entre los niveles 2p10 y 5d5) del átomo del kriptón 86, hasta que en 1983 se estableció el metro como la distancia recorrida por la luz en el vacío en 1/299,792,458 segundos, definición aceptada actualmente.



El newton (N). Una fuerza de 1 N produce una aceleración de 1 m/s² a un cuerpo cuya masa es 1 kg.

Peso y masa

Como ya se mencionó en cinemática, en las proximidades de la Tierra, todos los cuerpos caen con la misma aceleración cualquiera sea su masa. La caída de los cuerpos es consecuencia de la fuerza de atracción gravitatoria que ejerce la Tierra. Esta atracción gravitatoria es un caso particular de la ley de gravitación universal formulada por Newton y que se manifiesta entre dos masas cualesquiera. El valor de la aceleración gravitatoria en un planeta (g) depende del radio y de la masa del planeta que ejerce la atracción. Al medir la aceleración que adquiere un cuerpo en caída libre cerca de la superficie terrestre obtenemos valores distintos de acuerdo a la latitud geográfica debido, básicamente, a que somos observadores que rotamos fijos a la Tierra.

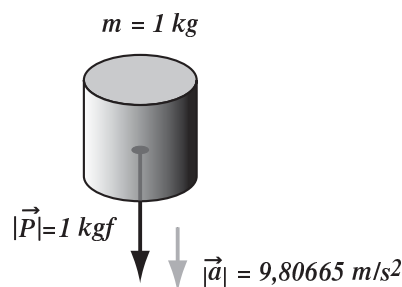
La fuerza con que la Tierra atrae a un cuerpo de masa (m) se denomina peso (\vec{P}) si es la única fuerza que actúa sobre el cuerpo, éste cae con la aceleración de la gravedad (\vec{g}) de modo que, aplicando la segunda ley de Newton, se obtiene la expresión

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g}$$

Observemos que según esta expresión en un lugar donde la aceleración de la gravedad es $9,80665 \text{ m/s}^2$ (es el valor que tiene al nivel del mar y a 45° de latitud) un cuerpo de masa 1 kg , pesa $9,80665 \text{ N}$. La masa de un cuerpo, que depende de la cantidad de materia que lo compone, no cambia si lo llevamos a la superficie de Júpiter o de la Luna; pero su peso, que depende del valor de la gravedad, en otro cuerpo celeste será diferente: cero en el espacio libre de masas, 12 veces el peso terrestre en Júpiter, $1/6$ del mismo en la Luna.

Existe otra unidad de fuerza utilizada frecuentemente que es el **kilogramo fuerza (kgf)**, que corresponde al sistema técnico, definida como el peso de la masa patrón (kilogramo masa) en condiciones normales ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$). Luego:

$$1 \text{ kgf} = 9,80665 \text{ N}$$



En el **sistema técnico** la fuerza es una unidad fundamental y la unidad de masa se deriva de las unidades de fuerza y aceleración utilizando la segunda ley. Esta unidad se denomina unidad técnica de masa (UTM).

En algunos desarrollos de este curso para la aceleración gravitatoria en la superficie terrestre utilizaremos la aproximación $g = 10 \text{ m/s}^2$ y entonces $1 \text{ kgf} = 10 \text{ N}$.

La masa de un cuerpo, a diferencia de su peso que depende de la interacción con la Tierra, es invariante, es decir, es constante en cualquier lugar del Universo. Es una medida de la inercia o resistencia al cambio del vector velocidad ante una fuerza aplicada y está relacionada con la cantidad de materia. En el lenguaje cotidiano masa y peso se confunden debido a que se usan nombres similares para las unidades de estas dos magnitudes distintas. Cuando decimos "un kilogramo de harina" nos referimos tanto a que su masa es 1 kg como a que, en la Tierra, su peso es 1 kgf .

Principio de interacción

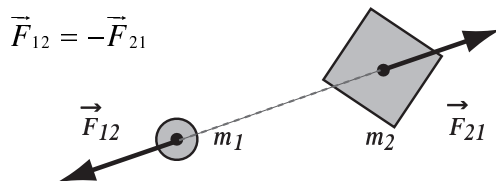
Hemos visto que las fuerzas producen cambios en el movimiento de un cuerpo. Newton dedujo que la fuerza sobre un cuerpo es sólo un aspecto de la interacción de éste con otro cuerpo. La interacción es clave para comprender la física involucrada en gran cantidad de fenómenos. Las fuerzas son siempre consecuencia de la acción mutua entre dos cuerpos aunque en muchos casos estudiemos cómo afecta a uno de ellos y no analicemos al otro. Se verifica experimentalmente que estas fuerzas son siempre iguales en módulo, tienen la dirección de la recta que uniría los dos cuerpos puntuales y sentidos opuestos. En la naturaleza no existen fuerzas aisladas.

Estos conceptos se formalizan en la **tercera ley de Newton o principio de interacción** que se enuncia como sigue:

Las fuerzas de interacción entre dos cuerpos puntuales son de igual módulo, tienen la dirección de la recta que pasa por ambos y sus sentidos son opuestos.

Es decir que cada vez que exista una fuerza sobre un dado cuerpo éste estará en interacción con otro cuerpo sobre el cual actuará una fuerza de igual módulo y sentido contrario. Newton enunció esta ley llamando acción y reacción a estas fuerzas.

En símbolos, este principio se escribe:



donde \vec{F}_{12} es la fuerza que recibe el cuerpo 1 por acción del 2 y \vec{F}_{21} es la fuerza que recibe el cuerpo 2 por acción del 1.

Si bien las fuerzas de interacción son de igual módulo y dirección y de sentido contrario:

- no se cancelan pues están aplicadas una en cada cuerpo.
- sus efectos son distintos: si son las únicas fuerzas y los objetos son puntuales, el efecto de la fuerza sobre cada cuerpo es producirle una aceleración inversamente proporcional a su masa.

El nombre de acción- reacción es poco feliz porque induce a pensar que una de las fuerzas antecede a la otra y en realidad ambas fuerzas son físicamente equivalentes, ninguna de ellas es respuesta a la otra.

Las fuerzas de interacción pueden ser de distinto tipo, de contacto o a distancia, atractivas o repulsivas.

En todos estos ejemplos los cuerpos involucrados son extensos, pero en esta primera parte de la dinámica, sólo nos interesa su movimiento como un todo y es en ese contexto que los consideraremos cuerpos puntuales.



La **fuerza atractiva a distancia** que la Tierra le hace a la manzana es de igual módulo que la fuerza que la manzana le hace a la Tierra. Ambas tienen la dirección de la recta que une sus centros y sus sentidos son opuestos.

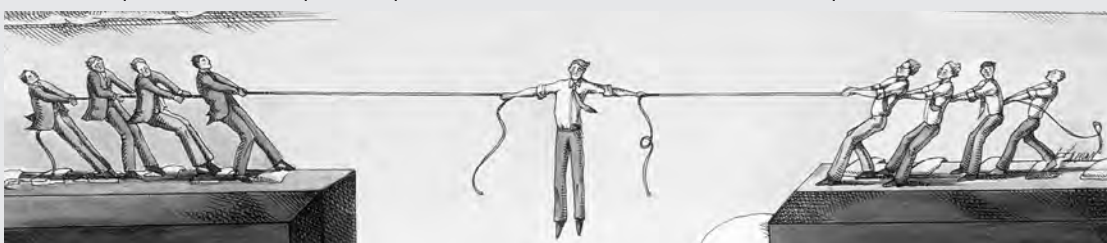


La **fuerza de contacto repulsiva** que el cañón le hace a la bala es de igual módulo que la fuerza que la bala le hace al cañón. La bala sale disparada mientras el cañón retrocede con menor aceleración pues su masa es mucho mayor.



¿Por qué, si la fuerza que hace el pie a la pelota es igualmente intensa que la que hace la pelota al pie, la pelota sale disparada y el pie no?

Actividad. Señale, por lo menos, seis pares de pares de fuerzas de interacción entre los cuerpos involucrados en esta escena.



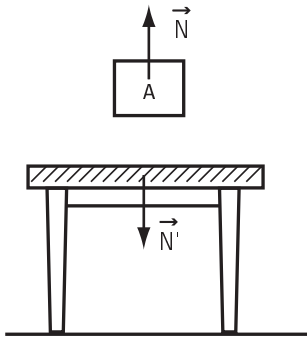
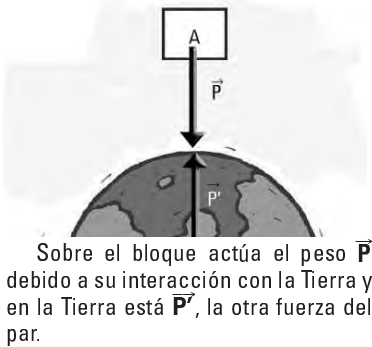
Estrictamente considerado, la soga **no** debería estar dibujada de modo horizontal (¿por qué?). Quizá la ilustradora quiso enfatizar que el personaje central está muy tironeado por ambas partes.

Aplicaciones de las leyes de Newton

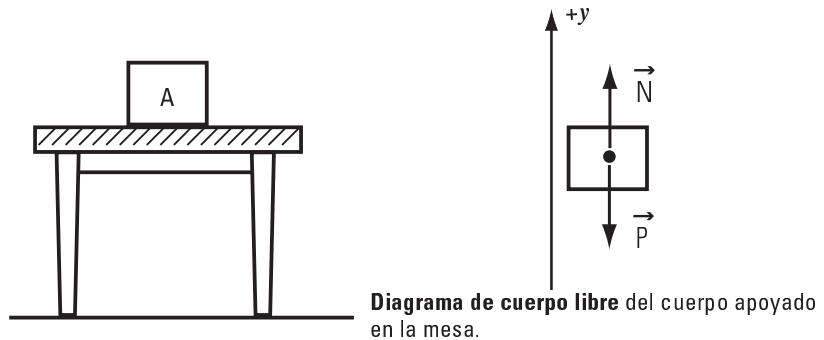
Para aplicar la segunda ley de Newton a un cuerpo lo aislamos imaginariamente y dibujamos la fuerzas que los demás cuerpos ejercen sobre él, sin ocuparnos de las fuerzas que dicho cuerpo hace sobre su entorno. Esta es la técnica del **diagrama de cuerpo libre**.

Ejemplo

Un bloque de masa 2 kg está apoyado en reposo sobre una mesa horizontal.



Al estar apoyado en la mesa, hay una interacción de contacto entre el bloque y la mesa. Existen dos fuerzas iguales en módulo, de la misma dirección y de sentidos opuesto: \vec{N} en el bloque y otra \vec{N}' mesa. La dirección de \vec{N} es perpendicular a la superficie de la mesa y nos referiremos a ella como fuerza normal (normal significa perpendicular).



Para aplicar la segunda ley de Newton nos valdremos del diagrama de cuerpo libre esquematizado en la figura. Idealizamos al cuerpo de tal forma que podamos considerarlo una partícula. Elegimos un punto del mismo donde podemos suponer concentrada toda su masa y en el que consideramos aplicadas todas las fuerzas. Debemos discriminar todas las acciones de los demás cuerpos sobre el que nos interesa para poder aplicar la segunda ley de Newton que relaciona la resultante de dichas fuerzas con la aceleración del cuerpo. En este caso la fuerza resultante sobre el bloque es la suma de los vectores \vec{N} y \vec{P} .

Sumar vectores implica tomar las proyecciones sobre ejes cartesianos. En este ejemplo las fuerzas tienen una única dirección y entonces basta tomar un único eje que llamaremos y .

Eligiendo arbitrariamente el sentido positivo hacia arriba, queda:

$$|\vec{N}| - |\vec{P}| = m \cdot a$$

que también podemos anotar

$$N - P = m \cdot a$$

donde N y P denotan los módulos de la fuerzas

En este caso aproximaremos $g = 10 \text{ m/s}^2$ con lo cual $P = 20 \text{ N}$

El bloque permanece quieto, es decir su aceleración debe ser cero y por tanto $N = P = 20 \text{ N}$. Observemos que en este caso:

- aunque las dos fuerzas que actúan sobre el bloque (\vec{N} y \vec{P}) son de igual módulo, la misma dirección y sentidos opuestos NO constituyen un par de interacción
- la interacción entre el bloque y la mesa es la adecuada para que el bloque permanezca en reposo (siempre y cuando la mesa no se rompa)

Ejemplo

Colocamos la mesa y el bloque adentro de un ascensor. ¿Cambian las fuerzas que actúan sobre el bloque si el ascensor se mueve?

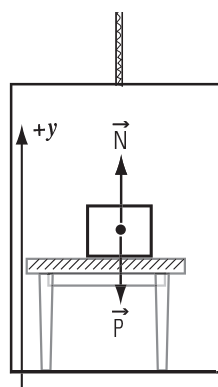
El cable accionado por un motor ejerce una fuerza sobre el ascensor pero no interactúa directamente con el cuerpo, ni tampoco ejerce una interacción a distancia. Es decir el bloque interactúa con los mismos cuerpos (Tierra y mesa) que en el ejemplo anterior.

La segunda ley de Newton vale en sistemas inerciales, no la podemos aplicar si intentamos describir la situación desde adentro del as-

sensor porque se trata de un sistema acelerado. Sí podemos utilizarla si describimos el movimiento desde Tierra. Como la mesa y el bloque están en reposo respecto del ascensor, vistos desde Tierra tienen todos la misma aceleración, luego:

$$|\vec{N}| - |\vec{P}| = m \cdot a$$

El peso del bloque es independiente del movimiento del ascensor, pero el valor de N no lo es y depende de la aceleración que tenga el bloque (que es la del ascensor). En la figura se dan los valores de N calculados para el bloque de masa 2 kg y diversos valores de aceleración.



Si sube a velocidad constante la aceleración es nula.
 $N = P$

Si arranca hacia abajo con aceleración de módulo 2 m/s²
 $N - P = 2\text{kg} \cdot (-2\text{m/s}^2)$
 $N = 16\text{ N}$

Si baja frenando con aceleración de módulo 2 m/s²
 $N - P = 2\text{kg} \cdot 2\text{m/s}^2$
 $N = 24\text{ N}$

Si arranca hacia arriba con aceleración de módulo 2 m/s²
 $N - P = 2\text{kg} \cdot 2\text{m/s}^2$
 $N = 24\text{ N}$

Si sube frenando con aceleración de módulo 2 m/s²
 $N - P = 2\text{kg} \cdot (-2\text{m/s}^2)$
 $N = 16\text{ N}$

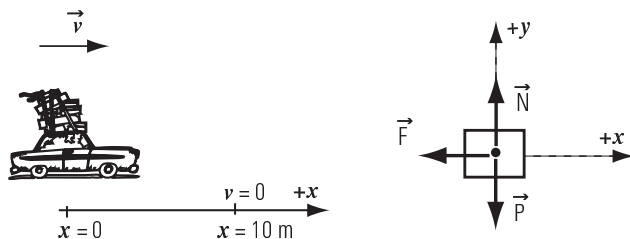
Si se corta el cable del ascensor
 $N - P = 2\text{kg} \cdot (-10\text{m/s}^2)$
 $N = 0\text{ N}$



Este ejemplo ayuda a comprender la sensación de “peso aparente” que sentimos cuando viajamos en un ascensor. La percepción de nuestro peso está determinada por la intensidad de la fuerza normal que sobre nosotros ejerce el piso del ascensor y es lo que indicaría una balanza de resorte intercalada entre nosotros y el piso.

Ejemplo

Un automóvil de 900 kg se mueve horizontalmente con velocidad de módulo 72 km/h. ¿Qué fuerza horizontal constante habría que ejercer para detenerlo en 10 metros?



La aceleración tiene la dirección x y como vimos en cinemática:

$$\begin{cases} a_x = \frac{v^2 - v_0^2}{2(x - x_0)} = \frac{0 - (20\text{ m/s})^2}{2 \cdot 10\text{ m}} = -20\text{ m/s}^2 \\ a_y = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum F_x = m \cdot a_x & -|\vec{F}| = m \cdot a_x \\ \sum F_y = m \cdot a_y & |\vec{N}| - |\vec{P}| = m \cdot a_y \end{cases}$$

$$\begin{cases} -|\vec{F}| = 900\text{ kg} \cdot (-20\text{ m/s}^2) = -18000\text{ N} \Rightarrow |\vec{F}| = 18000\text{ N} \\ |\vec{N}| = |\vec{P}| = 9000\text{ N} \end{cases}$$

El signo negativo para F indica que la fuerza a aplicar es opuesta al sentido elegido como positivo en el eje x . En este caso, hay 3 fuerzas actuando sobre el automóvil pero las dos verticales suman cero y \vec{F} resulta ser la fuerza neta por eso la aceleración es horizontal.



Actividad. Un elefante de 1000 kg se encuentra en reposo sobre un piso que presenta rozamiento despreciable; ¿qué intensidad mínima tiene la fuerza horizontal necesaria para comenzar a moverlo?

Prohibida la reproducción total o parcial de este material sin el permiso de la cátedra.