

Tema 4. Fuerzas

Con mucha frecuencia utilizas el término "fuerza", aunque seguramente no tienes muy claro su significado.

Fíjate en las imágenes siguientes y en las frases que se relacionan con ellas: "las bolas de billar golpean con mucha fuerza y salen en todas las direcciones con gran velocidad", "el ciclista tiene mucha fuerza en las piernas y mueve la bicicleta con soltura", "como tengo poca fuerza no puedo arrastrar el baúl", "la levantadora de pesas tiene mucha fuerza", etc.



1. ¿Qué es una fuerza?

Efectos de las fuerzas

Las fuerzas producen dos tipos de efectos a escala macroscópica: **cambios en el estado de movimiento de los objetos** (traslación o giro) y **deformaciones**.



Parece claro que para poner en movimiento un objeto que está en reposo hace falta una fuerza, lo mismo que para detener un objeto que se mueve. Pero ¿y para mantener en movimiento un cuerpo que ya se está moviendo? Como verás cuando avances en este tema, depende de la situación concreta: a veces hace falta una fuerza y a veces no.

En cuanto a las deformaciones y los giros, la situación es más clara: si quieres moldear un trozo de plastilina o estirar un muelle, solamente tienes que aplicar la fuerza necesaria tal y como te interese, y también debes realizar una fuerza para abrir una puerta.

La fuerza como interacción

Para que la bicicleta se mueva o mantenga su movimiento, el ciclista debe realizar una fuerza sobre ella al pedalear. Para que el baúl se mueva, alguien debe empujarlo o tirar de él. Fíjate en que hace falta que alguien o algo realice la fuerza sobre un objeto para que se manifieste algún tipo de efecto.

Las **fuerzas son una medida de la interacción entre dos cuerpos**, de manera que uno realiza la fuerza sobre el otro.

¿Qué es una fuerza?

Una fuerza es una **medida de la interacción entre dos cuerpos**, que puede dar lugar a cambios en:

- Su velocidad.
- Su forma.
- La dirección en la que se mueven.



La fuerza es el resultado de la interacción de dos cuerpos, pero no es algo que se acumule en ellos: una persona forzada sería aquella que es capaz de desarrollar una gran fuerza, pero no es que contenga fuerza en sí misma.

1.1 Tipos de fuerzas

Las fuerzas se pueden clasificar de varias formas. Si hay contacto directo entre la causa de la fuerza y el cuerpo sobre el que actúa, se llaman de **contacto**: si quieres arrastrar una maleta, no hay forma de hacerlo si no tiras directamente de ella.

Pero hay fuerzas que se manifiestan sin contacto directo. Ya has visto en cursos anteriores que las cargas eléctricas del mismo signo se repelen, y más cuanto más cerca se encuentran: se trata de fuerzas **a distancia**.

También se pueden clasificar según su naturaleza: **elásticas** (muelles), **gravitatorias** (el peso de los cuerpos), **eléctricas** (entre cargas del mismo o distinto signo) y **magnéticas** (imanes).

1.2 Midiendo fuerzas

Cuando tiras del extremo de un muelle, se alarga. Es algo que todo el mundo sabe. Pero ¿los muelles se estiran por igual si se les aplica la misma fuerza? ¿Depende el estiramiento de la fuerza aplicada?

El newton

Sobre un cuerpo actúa siempre al menos una fuerza: la atracción que la Tierra ejerce a distancia sobre él, llamada **peso**. Si la masa del objeto es **m**, su peso es **mg**. Pues bien, sobre una masa de un kg la Tierra ejerce una fuerza de 9,8 newtons (9,8 N), donde **el newton es la unidad de fuerza en el Sistema Internacional**.

La ley de Hooke

Para establecer la relación entre fuerza y alargamiento, vas a realizar la siguiente experiencia en el laboratorio, y después comprobarás los resultados utilizando un simulador.

A partir de datos experimentales, la ley de Hooke afirma que el estiramiento Δx producido al aplicar una fuerza F a un muelle es directamente proporcional al valor de la fuerza y al tipo de muelle, de acuerdo con la expresión **$\Delta x = kF$** .

También se puede expresar diciendo que la fuerza necesaria para producir un alargamiento Δx es proporcional al valor del alargamiento, y entonces se expresa como **$F = k\Delta x$** .



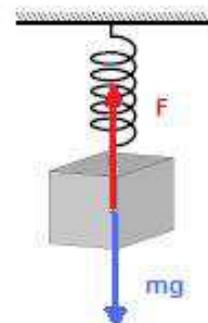
Ten en cuenta que la K tiene un significado distinto en cada caso: en el primero es el alargamiento producido al aplicar al muelle la unidad de fuerza, mientras que en el segundo es la fuerza que hay que aplicar al muelle para producir un alargamiento unidad.

1.3 El dinamómetro



Un dinamómetro no es más que un muelle calibrado, de forma que en lugar de indicar cuánto se estira marca el valor de la fuerza necesaria para producir ese estiramiento.

Si observas diferentes dinamómetros verás que si el muelle es poco consistente, se estira mucho aplicando poca fuerza, pero si se trata de un muelle hecho con cable grueso, necesita una fuerza muy intensa para estirarse.



Para saber el peso de un objeto, no tienes más que colgarlo y leer lo que marca el dinamómetro. Fíjate en el dibujo: el bloque de peso mg estira el muelle, que realiza una fuerza F para sostenerlo. Esta fuerza es la que marca el dinamómetro.

El peso de los cuerpos

Una masa de un kilogramo colgada de un dinamómetro tiene un peso de 9,8 N (que se suele aproximar a 10 N).

2. Carácter vectorial de las fuerzas

Fíjate en el saque de Rafa Nadal: según sea la intensidad del impacto de la raqueta con la pelota, su dirección, sentido y punto de aplicación, el efecto producido será diferente, y podrá significar un punto a favor o en contra en el desarrollo del partido de tenis.

Sucede lo mismo en todos los casos: no es lo mismo aplicar 10 N a un muelle en el sentido de alargamiento que en el de compresión, porque en un caso el muelle se estira y en el otro se comprime.

Es decir, **las fuerzas son magnitudes vectoriales**, ya que además de su **magnitud** (¡hacer más o menos fuerza!) hay que detallar otras características como la **dirección**, el **sentido** y el **punto de aplicación**.



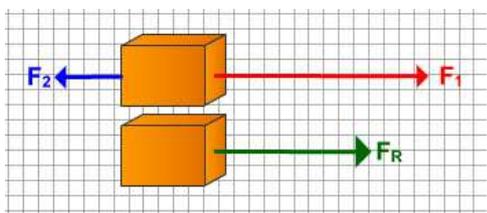
Las fuerzas son magnitudes vectoriales

Las fuerzas se representan mediante un **vector**, que es una flecha cuya longitud indica la **magnitud** de la fuerza, su **dirección** es la de la fuerza, el origen indica el **punto de aplicación** y la orientación del extremo el **sentido** de la fuerza.

2.1 Fuerza resultante

Es muy habitual que sobre un cuerpo actúen varias fuerzas, de forma que cada una de ellas por separado produciría un efecto diferente del que producen todas juntas.

Para saber el efecto que se manifestará cuando todas actúan a la vez se tiene que determinar cuál es la fuerza que aplicada al cuerpo produciría el mismo efecto que todas las que realmente se aplican, y que las sustituiría a todas ellas juntas. Es decir, establecer cuál es la **fuerza resultante**.



Fíjate en que si las fuerzas son perpendiculares puedes calcular la magnitud de la fuerza resultante utilizando el teorema de Pitágoras.

Si actúan varias fuerzas (F_1, F_2, F_3, \dots), se hace la resultante R_1 de F_1 y F_2 , después la resultante de R_1 y F_3 y así sucesivamente.

Resultante de dos fuerzas

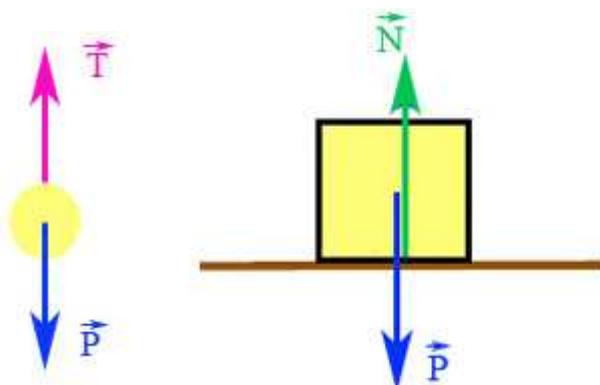
Si son **de la misma dirección y sentido**, la resultante tiene la misma dirección y el mismo sentido, y su magnitud es la suma de las magnitudes de las dos fuerzas.

Si son **de la misma dirección y de sentidos contrarios**, la resultante tiene la misma dirección, el sentido de la fuerza mayor magnitud, y su magnitud es la diferencia de las magnitudes de las dos fuerzas.

3. Equilibrio de fuerzas

Cuando sobre un cuerpo actúan varias fuerzas y la resultante de todas ellas es nula, el cuerpo se encuentra en **equilibrio de traslación**, lo que significa que **no cambia su estado de movimiento**. Es decir, si estaba en reposo, continúa en reposo, y si se estaba moviendo, continúa haciéndolo de la misma forma, manteniendo su velocidad.

Observa los dos diagramas. En el de la izquierda se representan las fuerzas que actúan sobre un objeto colgado de una cuerda: el **peso P** realizado por la Tierra, y la **tensión T** de la cuerda que lo sostiene. La resultante es nula, por lo que el cuerpo permanece indefinidamente en reposo mientras la situación se mantenga.



A la derecha se representan las fuerzas que actúan sobre un bloque apoyado en una superficie horizontal: su **peso** y la fuerza que realiza el plano sobre él y que lo sostiene, llamada habitualmente **normal** (en geometría, normal significa perpendicular). También se encuentra en equilibrio de traslación: cuanto mayor es el peso, más grande es la normal, pero ambas son de

magnitudes iguales pero de sentido contrario. Eso sí, puede suceder que cuando el peso sea excesivo la superficie no pueda soportarlo y se rompa, con lo que la normal no existe, actúa solamente el peso y el cuerpo cae.

Equilibrio en cuerpos apoyados o colgados

Como se mantienen con velocidad constante (en reposo) no hay aceleración. Y como sobre ellos actúa el peso, tiene que haber necesariamente otra fuerza de igual intensidad y dirección pero sentido contrario para que su resultante con el peso sea nula: la normal, reacción de la superficie de apoyo, o la tensión de la cuerda que sostiene al objeto.

3.1 Equilibrio de rotación

El efecto de giro de una fuerza viene dado por una magnitud llamada **momento de la fuerza**, que depende de la magnitud de la fuerza y de la distancia al eje de giro. En el caso de una puerta, de la fuerza con la que tiramos de ella y de la distancia desde el punto en que tiramos hasta el eje de la puerta, donde están las bisagras.

Fíjate en el simulador: el peso del portapesas por un lado y el dinamómetro por otro producen efectos de giro contrarios. Observa que el producto de lo que marca el dinamómetro por la distancia al tornillo de fijación de la regla es igual al peso de las pesas por su distancia al mismo punto.



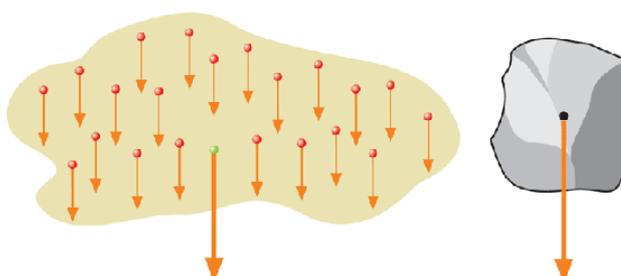
Se cumple, por tanto, que $\Sigma M = 0$, donde $M = F d$, teniendo en cuenta el signo del momento de cada fuerza según sea el efecto de giro que produce.

En equilibrio de rotación

Para que el efecto de giro sea nulo y haya equilibrio de rotación, el momento total debe ser cero: $\Sigma M = 0$, donde $M = F d$, teniendo en cuenta el signo del momento de cada fuerza según sea el efecto de giro que produce.

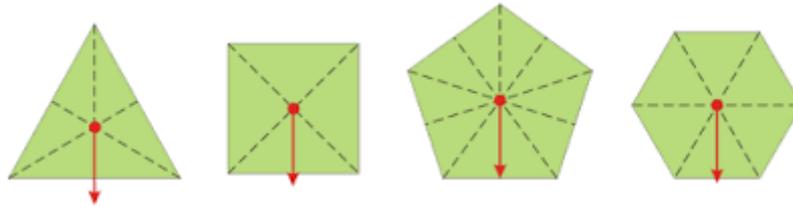
3.2 El centro de gravedad

El centro de gravedad (cdg) es el punto sobre el que se sitúa la resultante del peso que actúa sobre cada una de las partes del cuerpo. Es decir, se deja de considerar al cuerpo como una masa puntual y se tienen en cuenta su forma y dimensiones.



Determinación del centro de gravedad

Si el cuerpo es regular, es muy sencillo localizarlo: la intuición indica que estará en su centro geométrico.



Observa que en todos estos casos el centro de gravedad está dentro del cuerpo. Pero ¿siempre es así?. Fíjate ahora lo que sucede en el caso de objetos como los flotadores o los neumáticos. En estos casos, el cdg está en un punto que no pertenece al cuerpo.



Si el cuerpo es irregular, hay que recurrir al proceso experimental que se indica en la imagen.

Paso 1: Considerar una figura 2D arbitraria.	
Paso 2: Suspéndase la figura desde un punto cercano a una arista. Marcar la línea vertical con una plomada.	
Paso 3: Suspéndase la figura de otro punto no demasiado cercano al primero. Marcar otra línea vertical con la plomada. La intersección de las dos líneas es el centro de gravedad.	

El centro de gravedad y el equilibrio de los cuerpos

Para que un cuerpo esté en equilibrio de rotación, es decir, no gire ni se caiga, la vertical del cdg debe caer dentro de la superficie de apoyo del cuerpo.

¿Cómo funciona un tentetieso? En la imagen tienes un tentetieso de juguete para niños pequeños: se entretienen empujándolo para que comience a cabecear de un lado para otro.



¿Por qué lo hace? El punto de apoyo es muy pequeño, por lo que al empujar un poco al muñeco la vertical del peso cae fuera de la zona de apoyo; entonces se genera un momento de giro justo en el sentido contrario al del empujón, y cuando llega al otro lado y se detiene un instante, cae en sentido contrario, y así sucesivamente hasta que vuelve a quedarse vertical, en equilibrio.



En el vídeo puedes ver un tentetieso casero. Observa que es alto y además tiene una bola metálica arriba del todo. ¿Cuál es la razón? Cuanto más arriba tenga el cdg, más se desviará con un empujón y mayor será la oscilación (que es de lo que se trata).

La estabilidad de los cuerpos

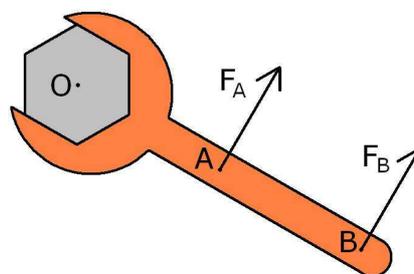
Para favorecer la estabilidad de los cuerpos y evitar que se caigan interesa que sean bajos y con una superficie de apoyo grande, para evitar que la vertical del cdg caiga fuera de la superficie de apoyo y el cuerpo vuelque.

3.3 Aplicaciones

Se trata ahora de que reflexiones y resuelvas situaciones interesantes relacionadas con el equilibrio de rotación.

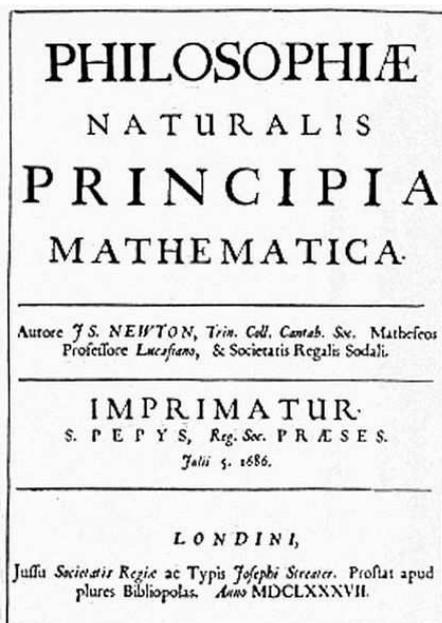
Para ello, solamente has de tener en cuenta que el efecto de giro depende de la fuerza realizada y de su distancia al eje de giro. Si actúan varias fuerzas, deberás asignar como positivo el efecto producido por una de ellas, de forma que serán positivos todos los que hagan girar al objeto de la misma forma, y negativos los que hagan girar al revés.

Fíjate en la llave inglesa de la imagen. Si se aplican fuerzas iguales en los puntos A y B, ¿en qué caso se producirá un efecto de giro mayor? En consecuencia, ¿interesa utilizar llaves inglesas de mango largo o corto?



Como el efecto de giro lo mide el momento de la fuerza, que es el producto de su módulo (magnitud) por la distancia al punto de giro, la fuerza aplicada en B producirá un giro mayor, y, por tanto, convendrá **tener llaves inglesas de mango largo**.

4. Dinámica



Una de las ideas más aceptadas desde que se comenzó a estudiar el movimiento de los astros en las culturas mesopotámica, egipcia y griega fue considerar que el estado perfecto de los cuerpos era el de reposo, que todos ellos tendían a alcanzar de forma natural (¿ya se pensaba en la hora de la siesta?).

Galileo Galilei (1564-1642), que medía todo lo que observaba, estableció que no era necesaria una fuerza para mantener el movimiento de un cuerpo.

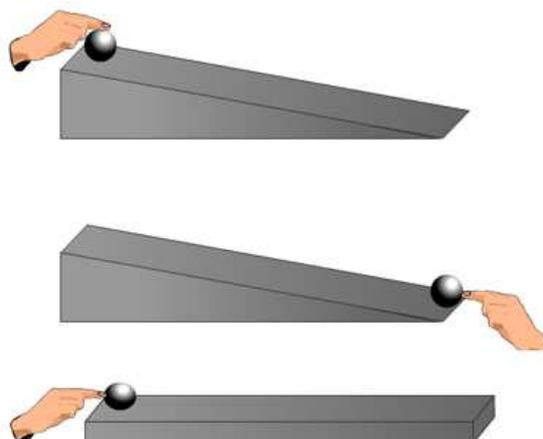
Posteriormente, **Isaac Newton** (1642-1727), el mayor genio científico de la historia del hombre -con permiso de Einstein- fue quien, basándose en los trabajos de Galileo, propuso las tres leyes que llevan su nombre, que en ese momento revolucionaron el conocimiento científico y que todavía siguen en vigor hoy en día.

En su libro Principios matemáticos de la Filosofía natural [Philosophiae Naturalis Principia Mathematica], publicado en 1687, se recogen sus descubrimientos en el cálculo matemático y la mecánica. Se considera como la obra de contenido científico más importante que se ha escrito.

4.1 Principio de inercia

Galileo experimentó con planos inclinados, haciendo rodar bolas por superficies planas inclinadas distintos ángulos con la horizontal. La conclusión a la que llegó es que como las bolas bajaban cada vez más rápidas y subían perdiendo rapidez, al rodar en un plano horizontal lo harían con rapidez constante.

Galileo construyó dos planos inclinados y los colocó en ángulos opuestos. Desde lo alto del primero de los planos soltó una bola que bajó rodando. Al llegar al segundo plano la bola subió por él hasta cierta altura. Galileo observó que la bola trataba de alcanzar la altura inicial.



Galileo repitió la experiencia reduciendo el ángulo del segundo plano y encontró que la bola subía siempre hasta la misma altura, aunque recorría una distancia mayor. Se preguntó ¿qué pasaría si el segundo plano fuera horizontal? Y llegó a la conclusión de que la bola seguiría rodando sobre la superficie para siempre.

Si se quiere mantener un cuerpo en movimiento, se debe seguir empujando debido al rozamiento y no a la naturaleza del proceso. Galileo afirmó que **los cuerpos tienden a permanecer en su estado de movimiento** y que, por consiguiente, oponen una resistencia a un cambio en su estado de movimiento.

Si la fuerza total que actúa sobre un cuerpo es nula, permanecerá en el estado de movimiento que tenga: en reposo, con velocidad nula, o manteniendo constante la velocidad que lleve.

Solamente has de tener en cuenta que uno de los efectos de las fuerzas es producir cambios de velocidad, por lo que si no actúan fuerzas netas no se producen esos cambios.

Se suele hablar de **la inercia como la tendencia que tienen los cuerpos a mantener su estado de movimiento**: permanecer en reposo si están quietos, o seguir moviéndose con la velocidad que llevan.

En este video puedes observar como un chico subido a un monopatín cumple la primera ley de Newton en dos casos diferentes



En la primera situación, la fuerza se ejerce sobre el monopatín poniéndolo en movimiento, sin embargo el chico tiende a permanecer parado, tal y como estaba, ya que la fuerza no se está ejerciendo sobre él.

En la segunda situación el chico se está moviendo subido en el monopatín, que al chocar con la colchoneta se para. Sin embargo el chico sigue moviéndose ya que sobre él la colchoneta no ha ejercido ninguna fuerza. Los puntos rojos marcan su movimiento, que será el mismo que tenía cuando estaba moviéndose antes de chocar.

Primera ley de Newton o ley de inercia

Si sobre un cuerpo no actúa ninguna fuerza, mantendrá el movimiento que llevaba inicialmente (se moverá en línea recta con velocidad constante o permanecerá en reposo).

La masa y la inercia

La masa es una medida de la inercia, es decir de la resistencia de un cuerpo a que lo pongan en movimiento, lo detengan o en general cambien su movimiento.

¿Fuerza total nula?

Debes tener en cuenta que sobre cualquier cuerpo actúa siempre su peso, la fuerza con la que la Tierra lo atrae, por lo que debe actuar al menos otra fuerza en los casos en los que la fuerza total resultante sea nula.

4.2 Ley fundamental

La aceleración producida es directamente proporcional a la fuerza total aplicada, e inversamente proporcional a la masa del objeto. Se suele expresar como:

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

Es importante que te des cuenta de que **F se trata de la fuerza total aplicada, de la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el objeto.**

Como este curso solamente trabajas con fuerzas que actúan en la misma dirección, no es necesario utilizar el carácter vectorial de las fuerzas, sino solamente su sentido para saber el signo de la aceleración, positiva o negativa, por lo que la expresión se reduce a **$\Sigma F = ma$** .

Segunda ley de la dinámica

La aceleración producida en un objeto es directamente proporcional a la fuerza total aplicada, e inversamente proporcional a la masa del objeto.

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

4.3 Principio de acción y reacción

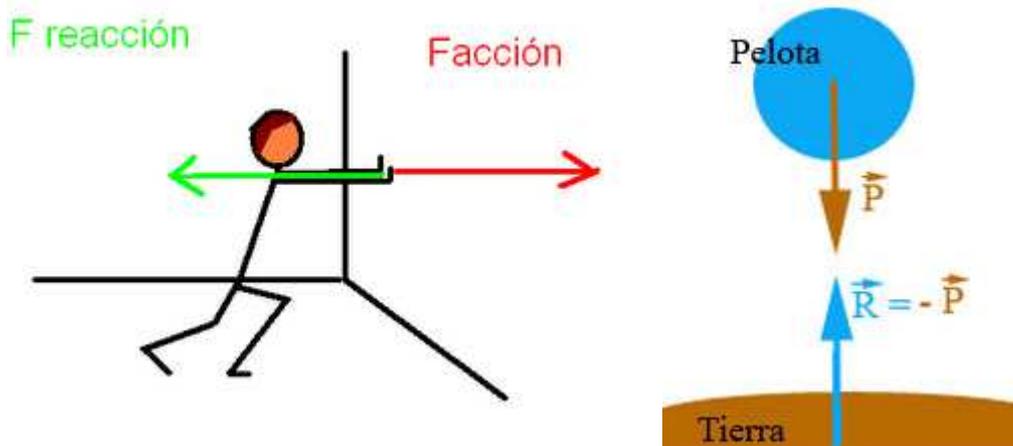
Cuando golpeas una mesa con el puño o la palma de la mano, sientes dolor. ¡Pero eres tú quien ha dado el golpe a la mesa! ¿Por qué te duele la mano? Además, el dolor será más intenso cuanto mayor sea la intensidad del golpe que hayas dado.



Para saber la razón debes tener en cuenta el tercer principio de la dinámica: **cuando un cuerpo A realiza una fuerza sobre un cuerpo B, éste cuerpo B aplica sobre A una fuerza de la misma intensidad y dirección, pero de sentido contrario**. Se trata de **dos fuerzas**, llamadas de **acción y de reacción**, que **no se anulan porque se aplican sobre cuerpos diferentes**.

Es decir, ¡es la mesa la que te devuelve el golpe!

En la imagen puedes ver lo que sucede cuando empujas la pared: ¡también te devuelve una fuerza de reacción que responde a la que tú estás aplicando!



El peso de los cuerpos también interviene en un par de fuerzas de acción y reacción. Como puedes ver en la imagen, la Tierra atrae a la pelota con una fuerza que llamamos el peso de la pelota (P), pero, a su vez, la pelota atrae a la Tierra con una fuerza que en el diagrama se indica como R .

Como actúa una fuerza neta sobre la pelota, le provoca una aceleración, que ya sabes que es la aceleración de la gravedad, g ($9,81 \text{ ms}^{-2}$). Sin embargo, como la masa de la Tierra es comparativamente enorme, la aceleración que le provoca la fuerza R de reacción es extraordinariamente pequeña y se puede despreciar con toda tranquilidad.

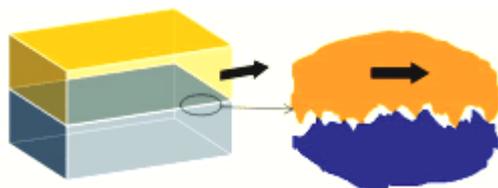
Tercera ley de Newton: acción y reacción

Cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro, éste ejerce una fuerza sobre el primero de la misma intensidad y dirección pero de sentido opuesto.

5. Rozamiento

Cuando lanzas un objeto por una superficie horizontal, lo que observas es que cada vez su velocidad es menor, hasta que llega a detenerse.

Por tanto, lleva una aceleración negativa, contraria al sentido del movimiento, lo que hace que su velocidad disminuya hasta anularse, y el móvil se para.



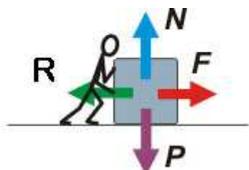
Si las caras del objeto están pulimentadas y la superficie sobre la que se desliza también (la pastilla de hockey en la pista de hielo!) se mueve durante mucho más tiempo y recorre más espacio hasta pararse.

¿Qué fuerza produce esa aceleración de frenado? Se llama **fuerza de rozamiento**, se opone al movimiento y se debe a la rugosidad de las dos superficies, que provoca que el deslizamiento de una sobre otra quede dificultado.

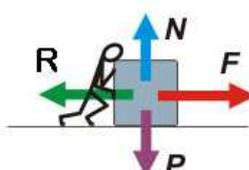
Rozamiento estático y rozamiento dinámico

Fíjate en la imagen, en la que se representa lo que sucede cuando se empuja un bloque que se pretende poner en movimiento para trasladarlo.

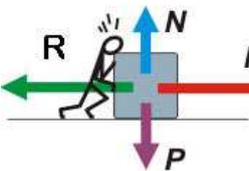
En la dirección vertical actúan el peso, realizado por la Tierra, y la normal, que realiza la superficie de apoyo. Como son iguales y de sentido contrario, el objeto no experimenta cambio de velocidad vertical y sigue en contacto con la superficie.



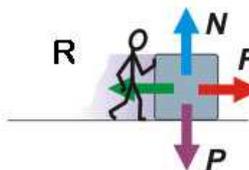
En la primera viñeta, el hombre empuja con una fuerza F , pero el bloque no se mueve porque hay una fuerza de rozamiento R igual y de sentido contrario, por lo que la aceleración es nula y no hay cambio de velocidad.



En la segunda, empuja con una fuerza mayor, con lo que aumenta el rozamiento pero la aceleración sigue siendo nula, ya que el bloque continúa sin moverse.



En la tercera todavía son mayores la fuerza de empuje y el rozamiento, pero el bloque sigue sin moverse.



Finalmente, en la cuarta viñeta el bloque comienza a moverse. Pero en ese momento disminuye la fuerza de rozamiento, con lo que la fuerza motriz para mantener el movimiento a velocidad constante es menor.

Es decir, es más difícil poner el bloque en movimiento que mantener el movimiento una vez que ya ha comenzado: **el rozamiento estático es mayor que el dinámico**.

Superficies que rozan

El rozamiento se debe a la rugosidad de las superficies, que se "enganchan" al intentar deslizar una sobre otra.

Si se tira de un cuerpo y no se mueve, es porque hay rozamiento, que nunca es mayor que la fuerza de tracción.

Es más fácil mantener un cuerpo en movimiento que conseguir que se mueva (el rozamiento dinámico es menor que el estático).

5.1 Coeficiente de rozamiento

El valor de la fuerza de rozamiento depende del valor de la fuerza normal que la superficie ejerce sobre el cuerpo; si la superficie es horizontal tiene una magnitud igual al peso del objeto (ya verás en Bachillerato que si el plano está inclinado la normal es menor que el peso).

Observa los dos vídeos siguientes: en el de la izquierda, al tirar del dinamómetro el objeto se pone en movimiento cuando la fuerza con la que se tira es igual a la fuerza de rozamiento estático (de 0,8 N), mientras que para mantenerlo en movimiento es suficiente con una fuerza de 0,4 N.



Como solamente vas a trabajar con planos horizontales, la relación entre la fuerza de rozamiento y la normal es una relación constante que se llama **coeficiente de rozamiento μ** , de forma que **$R = \mu mg$** .

Si las superficies en contacto rozan mucho, el coeficiente de rozamiento es grande, siendo habituales valores de 0,5-0,8. Si no rozan, desaparece la fuerza de rozamiento.



Fíjate en el coche de la simulación siguiente y en los valores de la fuerza que ejerce el motor y de la fuerza de rozamiento. Ten presente que el coche no se pone en marcha hasta que la fuerza motriz es mayor que la de rozamiento estático máxima, igual que sucede con el taco de rozamiento del vídeo.

Dinámica del rozamiento

El principio fundamental de la dinámica se aplica teniendo en cuenta la fuerza motriz F y la fuerza de rozamiento, μmg , que se opone al movimiento:

$$F - \mu mg = ma$$

La normal y el rozamiento

Para que haya rozamiento entre dos superficies deben estar comprimidas. En el caso de planos horizontales, la existencia de la normal (la reacción del plano de apoyo al peso del cuerpo que está sobre él) provoca que haya rozamiento: si no hay normal (fuerza perpendicular entre las superficies en contacto), no hay rozamiento.

6. Fuerza gravitatoria

Al analizar la caída libre de los objetos ya viste que caen con una aceleración que tiene un valor de $9,8 \text{ m/s}^2$ a nivel del mar. Pero ¿ese valor depende de la masa de los objetos?

La masa de los cuerpos y la aceleración de la gravedad

Puedes comprobar fácilmente que **el tiempo de caída es independiente de la masa** del objeto, por lo que puedes concluir que la aceleración de caída no depende de la masa del cuerpo que cae.

La fuerza que hace caer la bola de **masa m** con **aceleración g** se llama **peso P**, por lo que la ley fundamental de la dinámica en la caída libre se puede escribir como **$P=mg$** .

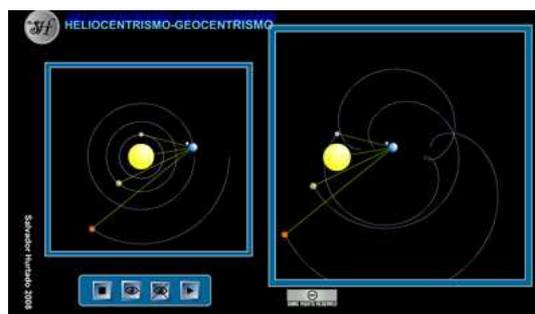
6.1 Concepciones del sistema solar

Desde hace más de 3000 años se observa el cielo para ver los astros y estudiar cómo se mueven, y hace ya mucho tiempo que se dio nombre a constelaciones, estrellas y otros astros. Pero fue en el siglo II cuando Ptolomeo propuso un modelo de Universo en el que la Tierra era el centro, y todos los demás astros giraban alrededor de ella. Este modelo **geocéntrico** se mantuvo durante toda la Edad Media, porque además suponía que también el hombre, que dominaba la Tierra por designio divino, era el centro del Universo.

Sin embargo, las observaciones de Brahe en el siglo XVII sobre las posiciones de los planetas retomaron el modelo **heliocéntrico** (el Sol era el centro del Universo) propuesto por Aristarco de Samos 2000 años antes. Kepler formuló leyes matemáticas que explicaban el movimiento de los planetas alrededor del Sol, y Galileo, utilizando un antejo, comprobó la certeza de esos estudios y descubrió los cuatro grandes satélites de Júpiter (Calixto, Europa, Io y Ganímedes).

Galileo difundió el modelo heliocéntrico, lo que casi le cuesta la condena a muerte por parte de la Inquisición, que le hizo renegar públicamente de su modelo heliocéntrico en 1633. Dice la leyenda que cuando terminó el juicio, salió de la sala diciendo "Eppur si muove" (y sin embargo se mueve), haciendo referencia a que la Tierra no era el centro del Universo, y que se movía.

Observa cómo se ven desde la Tierra las trayectorias de los astros en un modelo heliocéntrico y en uno geocéntrico. Ten en cuenta que los astros se mueven de la forma que lo hacen, y que los modelos solamente explican ese movimiento de forma diferente.



Las líneas blancas son las trayectorias que describen el Sol, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, mientras que las líneas amarillas representan la distancia entre la Tierra y esos astros.

6.2 La gravitación universal

Dice la leyenda que estando descansando Newton debajo de un manzano le cayó una manzana en la cabeza y se le ocurrió que caía porque la Tierra la atraía. Ése fue el origen de la teoría de la gravitación, que publicó a finales del siglo XVII ¡De tal forma se relaciona a Newton con la manzana que hasta se hacen muñecos!



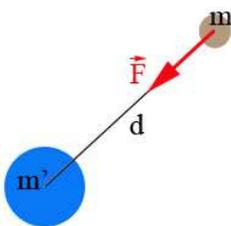
La Tierra atrae a los objetos con una fuerza que ya sabes que se llama peso. Pero se trata de una fuerza que se produce entre todos los cuerpos del universo por el hecho de tener masa, de forma que un cuerpo 1 atrae a un cuerpo 2, mientras que el cuerpo 2 a su vez atrae al cuerpo 1 (son dos fuerzas de acción y reacción).

La ley de gravitación universal

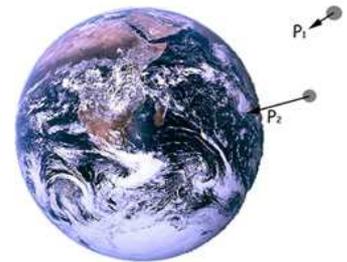
La fuerza de atracción gravitatoria **F** entre dos masas **m** y **m'** es:

$$F = G \frac{m m'}{d^2}$$

donde **G** es la constante de gravitación universal ($6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$) y **d** es la distancia entre las dos masas.



La fuerza de atracción entre los cuerpos se produce en la dirección que los une, como puedes ver en la imagen. En el caso del peso de un cuerpo, va dirigida siempre hacia el centro de la Tierra, esté donde esté el cuerpo y tenga la masa que tenga.



Fíjate en que al duplicarse la masa de un cuerpo, la fuerza gravitatoria se duplica, mientras que al duplicarse la distancia, la fuerza de atracción se hace cuatro veces menor.

El valor de g

Si en la ley de gravitación universal **m'** es la masa de la Tierra (M_{Tierra}) y **d** su radio (R_{Tierra}), **F** será el peso **P** del objeto de masa **m** en la superficie de la Tierra, por lo que puedes deducir que el valor de **g** es:

$$F = G \frac{m m'}{d^2}$$

$$P = mg$$

$$g = G \frac{m'}{d^2} = G \frac{M_{Tierra}}{R_{Tierra}^2}$$

Si sustituyes los valores de la masa de la Tierra ($5,97 \cdot 10^{24}$ kg) y de su radio medio (6371 km) obtendrás un valor de g de $9,81 \text{ N kg}^{-1}$. Es decir, una masa de un kg queda atraída por una fuerza de 9,81 N.

Significado y unidades de g

Como tiene dos significados diferentes, también tiene dos unidades distintas. Por un lado, es la aceleración de caída libre, que en la superficie de la Tierra y a nivel del mar es de $9,81 \text{ m s}^{-2}$, pero por otro es la fuerza con la que la Tierra atrae a una masa de un kg, que en las mismas condiciones tiene un valor de $9,81 \text{ N/kg}$.

6.3 El peso de los cuerpos

Cuando la fuerza gravitatoria la ejerce un astro sobre un objeto situado cerca de su superficie, la fuerza realizada se llama peso. Por esa razón se habla de peso en la Tierra, en la Luna, en Marte, etc.

Si aplicas la ley fundamental de la dinámica en la caída libre, en la que la única fuerza que actúa es el peso, tendrás que $\Sigma F = ma$ se reduce a $P = mg$, con lo que la aceleración de caída libre tendrá el valor de g, que es de $9,81 \text{ m s}^{-2}$.

El peso de los cuerpos y la altura

El valor de g obtenido es cierto para una distancia al centro de la Tierra de 6371 km, que es un valor promedio, ya que la Tierra está achatada por los polos. Naturalmente, al aumentar la distancia disminuye g, por lo que **el peso de los cuerpos es menor al aumentar la altura**. En la cima del Everest, que tiene 8,8 km de altura, tiene un valor de $9,78 \text{ m s}^{-2}$.



El peso en la Luna

En la superficie de la Luna la aceleración de la gravedad tiene un valor distinto, ya que los valores de su masa y su radio son distintos ($7,35 \cdot 10^{22}$ kg y 1737,4 km). Sustituyendo en la ley de gravitación universal, g tiene un valor de $1,62 \text{ m s}^{-2}$. Como es un valor muy pequeño, **los astronautas pesan mucho menos en la Luna que en la Tierra** (aproximadamente, la sexta parte), por lo que al moverse dan grandes saltos con facilidad.



La masa y el peso

La masa es la cantidad de materia de un objeto. Se mide en una balanza y su unidad de medida es el kilogramo.

El peso es una fuerza que resulta de la interacción de dos cuerpos con masa. Se mide con un dinamómetro y su unidad de medida es el Newton.

La masa es invariante, lo que quiere decir que no varía independientemente de dónde se encuentre; sin embargo, el peso puede variar dependiendo del lugar donde se encuentre.

El martillo y la pluma

Se trata de una de las experiencias más famosas realizadas en la historia de la ciencia. En la misión Apolo 15, el astronauta David R. Scott llevó a cabo en la Luna un **experimento inspirado en la idea de la caída libre de Galileo**: dos objetos de masa diferente caen con la misma aceleración en ausencia de rozamiento con el aire. En este caso tomó un martillo y una pluma y comprobó que caían llegando a la vez al suelo.

Aerodinámica

Ya has visto que el rozamiento del aire es muy apreciable: la bola y la hoja de papel, el martillo y la pluma, etc. Resulta especialmente importante en el movimiento de los automóviles, de forma que el consumo de combustible crece muy deprisa al aumentar la velocidad. Por esa razón se indica el consumo a 90 km/h, ya que a 120 km/h puede incrementarse en un 20 %.

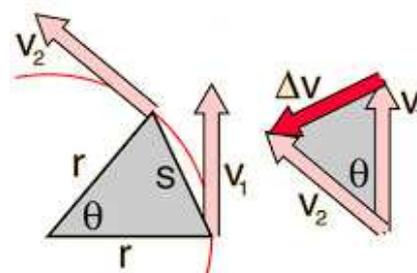
Para reducir este efecto los coches y camiones se construyen de manera que presenten la menor resistencia contra el aire; se dice que tienen coeficientes aerodinámicos pequeños, y por eso su parte delantera tiene forma de cuña. Además, los camiones suelen tener deflectores aerodinámicos entre la cabina y la caja de carga.



6.4 La fuerza centrípeta

Ya sabes que cuando la velocidad cambia de dirección hay aceleración, porque se produce un cambio en la velocidad. Esa aceleración recibe el nombre de centrípeta y la fuerza que la produce, provocando el cambio de dirección del móvil, se llama fuerza centrípeta.

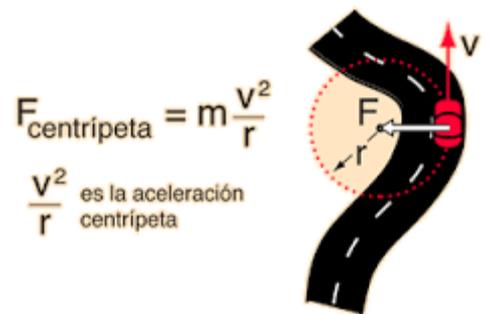
Si te fijas en la imagen, cuando el móvil se mueve y la velocidad pasa del vector v_1 al vector v_2 , la diferencia entre esos dos vectores está en la dirección del centro de curvatura de la trayectoria seguida por el móvil (el radio si es circular). Como el vector aceleración mide la variación del vector velocidad por unidad de tiempo, su dirección es precisamente la del centro de curvatura: por esa razón se llama centrípeta.



En el vídeo puedes ver lo que sucede cuando la trayectoria del móvil es poligonal y tiende a un círculo: en todos los casos la dirección de la aceleración es hacia el centro de la figura geométrica, tendiendo al centro del círculo conforme aumenta el número de lados.

¿De qué factores depende la aceleración centrípeta?

Cuanto más deprisa se mueve el móvil, más varía la dirección del vector velocidad por unidad de tiempo. Lo mismo sucede cuanto más cerrada es la curva que describe. Es decir, la aceleración es mayor cuanto mayor sea la velocidad v y menor el radio de curvatura r . Se puede demostrar (pero se deja para Bachillerato) que el módulo de la aceleración se calcula como v^2/r .



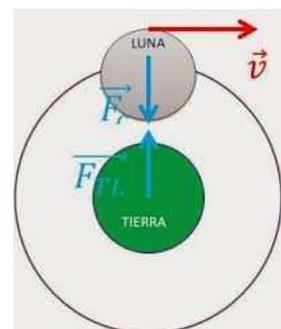
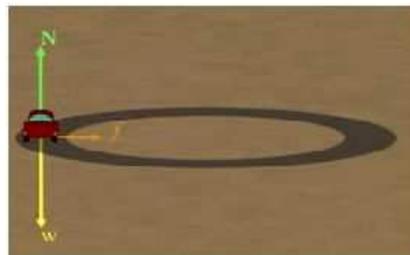
La aceleración centrípeta

Se produce cuando el movimiento no es rectilíneo, está dirigida hacia el centro de curvatura de la trayectoria y su valor es v^2/r .

Fuerza centrípeta

Como siempre que hay una aceleración, su causa es una fuerza: en este caso, la fuerza centrípeta. ¿Cuál es el origen de la fuerza centrípeta? Ahora vas a ver algunos ejemplos en movimientos circulares, que son los más sencillos e importantes en los que hay fuerzas centrípetas.

Fíjate en el lanzador de martillo, que gira para imprimir velocidad al aparato y que llegue lo más lejos posible cuando lo suelte. Como ves en la imagen, él es quien realiza la fuerza centrípeta, tirando de la cadena y evitando que la bola salga de la trayectoria.



Sistemas de referencia no inerciales: la fuerza centrífuga

Hasta ahora has trabajado con sistemas de referencia que están en reposo (o que se mueven con velocidad constante), que se llaman **sistemas inerciales** porque en ellos se cumplen las leyes de Newton: para que un cuerpo tenga aceleración ha de actuar sobre él una fuerza exterior.

Pero a veces hay que interpretar situaciones en las que **el sistema de referencia lleva aceleración, y se dice que es no inercial**. Ahora vas a ver cómo hay que proceder para poder aplicar las leyes de la dinámica en estos casos.

Seguro que te has fijado en que cuando un coche frena, un objeto situado en el asiento delantero sale lanzado hacia delante, o que si el coche toma una curva el objeto se desplaza hacia la puerta. Cuando el fenómeno se ve desde el punto de vista de un observador inercial, ve que el coche frena

o que está tomando una curva, y entonces sabe que como no actúa la fuerza de frenado o la centrípeta sobre el objeto, éste sigue con la velocidad que llevaba: adelanta al coche cuando frena, o se desvía cuando toma la curva.

¿Pero y si el observador está fijo dentro del coche y se mueve con su misma aceleración (sistema no inercial)? ¿Cómo puede interpretar que el objeto salga hacia delante o hacia la puerta si él no aprecia ninguna aceleración en el sistema de referencia?

La única solución para poder aplicar las leyes de la dinámica sobre el objeto que sale hacia adelante con aceleración o se sale de la curva, es suponer que es una fuerza ficticia la que produce esas aceleraciones. Esa fuerza se llama en general fuerza de inercia, y en el caso concreto de los movimientos circulares, fuerza centrífuga.

Observa en las imágenes cómo se debe utilizar la fuerza centrífuga. De todos modos, en este curso solamente vas a usar sistemas de referencia inerciales, por lo que no vas a necesitarla.



La fuerza centrífuga

Las fuerzas de inercia no son fuerzas reales, sino ficticias: la fuerza centrífuga no existe, ya que los efectos observados los produce la ausencia de fuerza centrípeta.