

FISICA I**UNIDAD III - DINÁMICA****Contenido**

UNIDAD III – DINÁMICA	2
UN POCO DE HISTORIA	2
FUERZA	3
Primera Ley. INERCIA	3
Segunda Ley. MASA	4
Tercera Ley. ACCIÓN Y REACCIÓN	4
Ley de GRAVITACIÓN UNIVERSAL	5
CAIDA LIBRE. PESO Y MASA	6
UN CASO DE CAÍDA LIBRE. TIRO HORIZONTAL	7
RELACIÓN ENTRE PESO Y MASA	9
EL CAMPO GRAVITATORIO	10
FUERZAS ELÁSTICAS	12
Ejemplo	13
FUERZAS DE ROZAMIENTO	14
DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE	16
Ejemplo	16
RESUMEN.....	19
RESPUESTAS A LOS EJERCICIOS.....	20

UNIDAD III – DINÁMICA

La dinámica se ocupa principalmente del estudio de los cambios en el estado de movimiento de los cuerpos, en relación con las interacciones o fuerzas externas aplicadas a los mismos.

Veremos que un cuerpo no modifica su estado de movimiento (velocidad) si no se le aplica alguna fuerza externa, de donde se deduce que al ser necesario ejercer una fuerza para cambiar la velocidad de un cuerpo, este cambio de velocidad (aceleración) estará necesariamente relacionado con la fuerza aplicada.

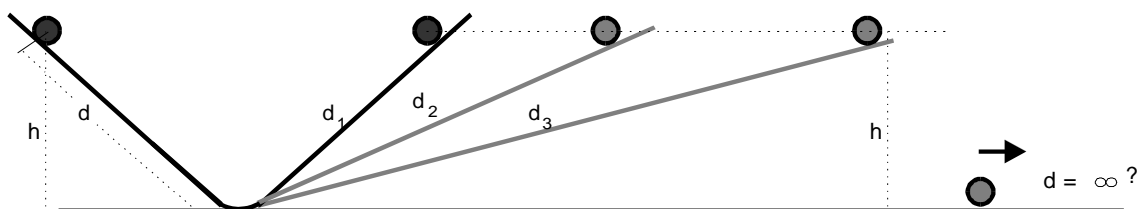
Estudiaremos las leyes que describen estos comportamientos y pondremos especial énfasis en un importante tipo de fuerzas: la interacción gravitatoria.

UN POCO DE HISTORIA

Para Aristóteles, el gran filósofo griego, los movimientos podían ser naturales o forzados. Un movimiento natural era, por ejemplo, la caída de un cuerpo, el que por su *naturaleza* tendía a dirigirse hacia el centro del Universo, que coincidía con el centro de la Tierra. En cambio, un cuerpo en reposo sobre una superficie, para moverse debía ser forzado a ello. En cuanto cesaba la causa, cesaba el movimiento. Como se ve, todo muy lógico y apoyado en las evidencias del sentido común y las observaciones de los hechos diarios.

Pasaron muchos años, casi 2000, hasta que Galileo Galilei hizo tambalear esta concepción con un experimento muy simple y una gran audacia intelectual.

El observó que dejando caer una esfera por el plano inclinado de la izquierda, recorría por la rama derecha casi la misma distancia d . Luego fue variando la inclinación del plano de la derecha y observó que las distancias recorridas aumentaban progresivamente, $d_1 < d_2 < d_3$, pero la altura alcanzada h era siempre casi la misma. Galileo dedujo correctamente que si la esfera no alcanzaba exactamente la altura original, era porque la interacción con la superficie



sobre la cual rodaba le restaba algo de la capacidad que le había dado el partir desde una altura h . Y aquí vino el salto creativo. Se preguntó: ¿qué pasaría si la pendiente del lado derecho fuese nula y la interacción pudiese hacerse también nula? La respuesta es clara, la esfera no se detendría nunca, pues por más que recorriese, nunca alcanzaría la altura original.

Vemos entonces que, si la esfera, ya está en movimiento, recorriendo una superficie horizontal, lo que necesita para moverse indefinidamente es que *no* exista interacción con la superficie, o sea *nada*. En realidad necesita de *algo* para que el movimiento *cambie*: ese algo es lo que hoy llamamos *fuerza*.

FUERZA

Este concepto está ligado a nuestra experiencia diaria desde que nacemos. Lo asociamos con la acción de nuestros músculos y también con nuestro peso y el de todos los objetos que nos rodean. Empujar, tirar, levantar, son todas acciones que asociamos con fuerza. Pero hay características del *concepto científico de fuerza* a las que debemos prestar especial atención:

Las fuerzas no están asociadas a la existencia de movimiento, sino a los cambios del mismo.

- 1) Reconocemos la existencia de fuerzas por sus efectos. Básicamente cambiar el estado de movimiento de los cuerpos, la forma de los mismos, o ambas cosas.
- 2) Las fuerzas son *siempre* el resultado de la interacción de dos o más cuerpos.
- 3) Como resultado de esta interacción las fuerzas aparecen de a *pares*, iguales y opuestas.
- 4) La fuerza, como magnitud, es vectorial. Además de su valor absoluto, módulo o intensidad, debe especificarse su dirección y sentido (no es lo mismo una fuerza que actúe hacia arriba que una que actúe hacia abajo, por más que sus intensidades sean iguales).

Interpretando con estas ideas la experiencia de Galileo, podemos decir que la esfera en el tramo horizontal sufre la acción de una fuerza de rozamiento, (también llamada fricción y que causará finalmente su detención), resultado de la interacción con la superficie en que se apoya. Cuánto más lisas las superficies en contacto, menor es la interacción que llamamos fuerza.

El año en que murió Galileo (1642) nació Newton, quien habría de organizar estas nuevas ideas sobre la mecánica y echar las bases de lo que hoy llamamos Mecánica Clásica. Consideraremos sus tres leyes de la mecánica, verdaderos cimientos de la Física y su contribución más popular, la Ley de Gravitación Universal.

Primera Ley. INERCIA

Un objeto en reposo o en movimiento con velocidad constante, continuará en dicho estado a menos que sobre él actúe una fuerza externa.

Este enunciado refleja el experimento de Galileo y se describe esta tendencia al no cambio diciendo que los cuerpos poseen inercia.

Ejercicio 3.1: ¿Por qué son tan raros los ejemplos de MRU en la naturaleza?

Segunda Ley. MASA

La aceleración que adquiere un cuerpo por efecto de la fuerza externa total que actúa sobre él, resulta directamente proporcional a la magnitud de esta fuerza, tiene su misma dirección y sentido, y es inversamente proporcional a la masa del cuerpo.

$$F = m a$$

Esta segunda ley es, de alguna manera, la versión cuantitativa de la primera ley, permitiendo calcular cuál es la variación en el estado de movimiento de un cuerpo debida a la acción de una fuerza. Se incorpora aquí un concepto fundamental: el de *masa* (m), que mide el valor de la *inercia*, a través de la relación entre la *fuerza* (F) y la variable cinemática *aceleración* (a).

Se indican en negrita tanto la fuerza como la aceleración, remarcando el carácter vectorial de ambas magnitudes. Esta ley establece claramente que el efecto de una fuerza sobre un cuerpo no es comunicarle movimiento, sino cambiar su estado de movimiento, o sea su velocidad, a partir de la aceleración que le produce.

Ejercicio 3.2: ¿Cuál será la fuerza neta media sobre un automóvil de 1200kg de masa, si su velocidad cambia de 80 a 100 km/h en 25s? ¿Cómo será la interacción entre las ruedas de tracción y el piso, comparada con la fuerza calculada?

Tercera Ley. ACCIÓN Y REACCIÓN

Cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro, el segundo cuerpo ejerce sobre el primero una fuerza igual y de sentido contrario.

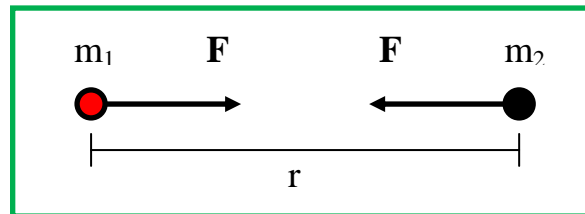
Esta ley expresa la característica de las fuerzas de aparecer de a pares. Toda fuerza es producto de una interacción que involucra dos partes, sobre cada una de las cuales aparecen sendas fuerzas, iguales en intensidad pero de sentidos opuestos.

Ejercicio 3.3: En el ejercicio anterior, ¿es el piso el que empuja al automóvil?

Ley de GRAVITACIÓN UNIVERSAL

La propia estructura del Universo está originada a partir de una interacción muy particular que ocurre entre los cuerpos y es el hecho que dos cuerpos con masa siempre se atraen entre sí, con una fuerza que depende de la masa de los cuerpos en interacción y de la distancia a la cual se encuentren separados.

El hecho de que los planetas giren alrededor del Sol, que la Luna gire alrededor de la Tierra, que las estrellas se formen y que se agrupen en galaxias, es debido a la existencia de esta interacción tan única como intrigante.



La ley de gravitación universal surgió a partir de la observación que el propio Isaac Newton realizó sobre el movimiento de caída de los cuerpos y establece que:

Dos cuerpos de masas m_1 y m_2 separados por una distancia r , se atraen entre sí con una fuerza (F) que es directamente proporcional al producto de las masas de ambos cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

La constante de proporcionalidad G , se denomina constante de gravitación Universal y vale $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^{-2}$, que es el factor de conversión para que la fuerza resulte expresada en Newton [N], unidad de fuerza en el sistema internacional de unidades, en tanto las masas se expresan en kg y la distancia en m. Como se ve G tiene un valor muy pequeño que refleja la debilidad de la interacción gravitatoria, que sólo se hace notable cuando intervienen masas planetarias.

Los primeros valores de la constante G se calcularon a mediados del siglo XIX a partir de los datos que había obtenido Henry Cavendish en su famoso experimento, publicado en 1798, en el cual determinó la densidad de la Tierra.

Es importante observar que la masa definida por la segunda ley de Newton refleja la propiedad de inercia y, en principio, no tendría por qué ser la misma que la que interviene en la ley de gravitación universal, ya que se trata de fenómenos distintos. Sin embargo, los experimentos demuestran que las llamadas *masa inercial* y *masa gravitatoria* son iguales.

Ejercicio 3.4: *Calcular la fuerza gravitacional entre un astronauta (masa = 100kg) y la plataforma espacial (masa = 22000kg) cuando se encuentran a 20m de distancia. ¿Qué aceleración adquiere el astronauta?*

CAIDA LIBRE. PESO Y MASA

A la luz de la Ley de Gravitación Universal se entiende que todos los cuerpos en las cercanías de la Tierra, o sobre su superficie, son atraídos por ésta con una fuerza. A la fuerza con que la Tierra atrae un cuerpo que se encuentra en su superficie la llamamos peso del cuerpo.

El peso es la causa de que los cuerpos, si no son detenidos, caigan en dirección al centro de la Tierra. Y caen con un movimiento acelerado, ya que una fuerza (su peso) actúa sobre ellos en forma permanente. Veamos si con las herramientas que ya tenemos, podemos calcular el valor de esta aceleración.

Por la segunda ley de Newton

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

y de acuerdo con la ley de gravitación universal, podemos escribir

$$F = G \frac{m M}{r^2} = m \frac{G M}{R^2}$$

donde aquí M se refiere a la masa de la tierra y R es la distancia entre el centro del cuerpo y el centro de masa de la Tierra (que coincide aproximadamente con su centro), es decir que R representa el radio de la Tierra. Dado que el radio de la Tierra R es de alrededor de 6400 Km, esta será una aproximación suficientemente buena aún para cuerpos que se encuentren a alturas del orden de 1 Km sobre la superficie terrestre.

Vemos entonces que todo lo que multiplica a m en esta última fórmula es una constante, que constituye el factor de conversión entre la masa de un cuerpo y su peso (F). Llamemos a esta constante g

$$g = \frac{G M}{R^2}$$

Reemplazando en la ecuación debida a la segunda ley de Newton, y dado que las masas gravitatoria e inercial son iguales, obtenemos que

$$a = \frac{F}{m} = \frac{m g}{m} = g$$

resultado que expresa que la aceleración que adquiere un cuerpo, debida a la acción de su propio peso, es independiente de la masa del mismo y depende de su posición respecto del centro de la Tierra.

¿Quiere decir esto que dos cuerpos caerán con la misma velocidad independientemente de su peso? Sí, pero sólo si no actúa ninguna otra fuerza. Nuestra experiencia diaria está relacionada con cuerpos que caen interactuando con el aire y en esas condiciones la forma del cuerpo tiene gran influencia, en cuanto a la fuerza de fricción que el aire ejerce sobre él.

Debido a factores que no analizaremos aquí, g varía ligeramente con la posición sobre la superficie del planeta. Su valor aproximado es

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

Ejercicio 3.5: ¿Cuánto aumenta, cada segundo, la velocidad de un cuerpo en caída libre en las cercanías de la superficie terrestre?

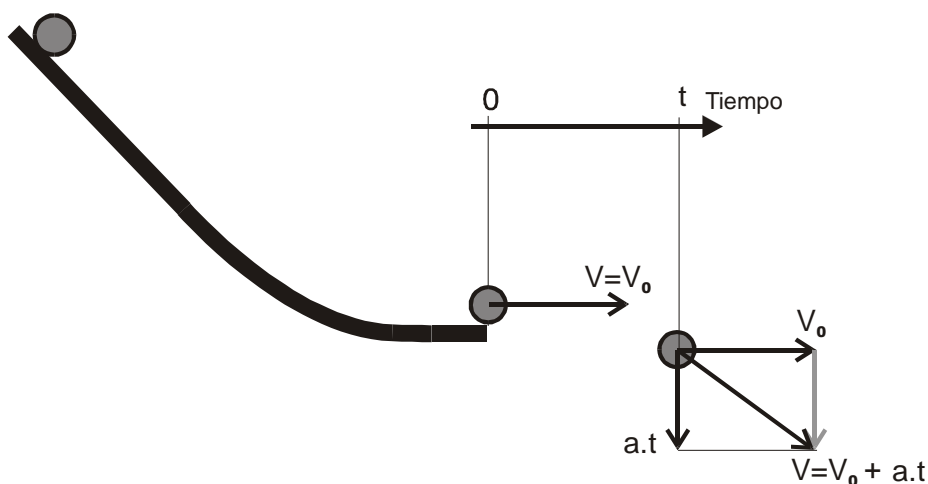
Obsérvese que el hecho de que g tenga dimensiones de aceleración tiene que ver con que es el factor de proporcionalidad entre una fuerza (el peso) y una masa y la segunda ley de Newton condiciona esas dimensiones. Pero además es *físicamente* una aceleración. Es la aceleración que adquiere cualquier cuerpo cayendo en ausencia de otras interacciones. Esta es la situación que se conoce como *caída libre*.

UN CASO DE CAÍDA LIBRE. TIRO HORIZONTAL

Para apreciar algunas consecuencias importantes de esto, volvamos a las leyes de la cinemática. La velocidad de un móvil que sufre una aceleración constante está dada por:

$$v(t) = v_0 + a t$$

Por la segunda ley de Newton, la aceleración del móvil es directamente proporcional a la fuerza total que actúa sobre el cuerpo y *tiene su misma dirección*. Esta dirección puede o no, coincidir con v_0 y en todo caso, ambos términos se sumarán *vectorialmente* para dar la velocidad instantánea. En el gráfico siguiente se intenta representar un caso de caída libre donde la velocidad inicial tiene una dirección distinta a la vertical.



La velocidad y el tiempo en un tiro horizontal

Es fácil imaginarse qué pasa a medida que el tiempo crece. Mientras la componente horizontal de la velocidad se mantiene constante, la vertical crece linealmente con el tiempo y la resultante se va inclinando progresivamente hacia abajo. Para tiempos suficientemente altos, la velocidad total será *prácticamente vertical*.

Ejercicio 3.6: La bola de la figura anterior tarda 4 segundos en llegar al suelo y se sabe que $V_0 = 2\text{m/s}$. ¿A qué distancia del extremo de la rampa tocará el suelo?

Si en el ejemplo anterior analizamos la evolución en el tiempo de la posición del cuerpo que cae, tendremos:

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}_0 + \mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2} \mathbf{a} t^2$$

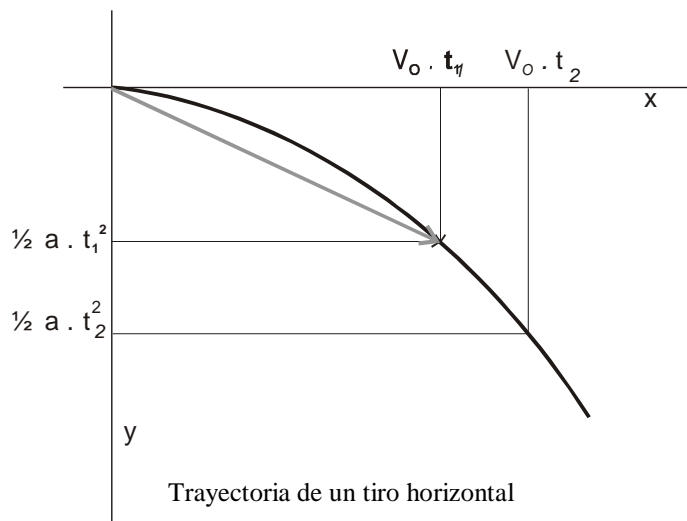
donde \mathbf{s} indica la posición del móvil en el plano (x, y).

Tomando $\mathbf{s}_0 = (0, 0)$ (lo que es equivalente a considerarlo nuestro punto de referencia), otra vez tenemos la suma de dos vectores perpendiculares entre sí. Para verlo claramente, podemos escribir una ecuación para cada dirección ortogonal:

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{1}{2} a_x t^2 = v_{0x} t$$

$$y = y_0 + v_{0y} t + \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} g t^2$$

Ahora ambos desplazamientos son función del tiempo, aunque son funciones distintas. Mientras el término horizontal crece linealmente, el vertical lo hace según una función de segundo orden. La sucesión de valores que toma \mathbf{s} en el plano (x,y) conforman la trayectoria de nuestro cuerpo, y presentan, como se comprende, un perfil parabólico.



Ejercicio 3.7: Cuando un cuerpo cae en un medio viscoso, como el agua o el aire, finalmente alcanza una velocidad que ya no se modifica. Si éste fuera el caso del ejemplo anterior, ¿qué forma tendría la trayectoria? ¿Por qué le parece que la velocidad no sigue aumentando?

RELACIÓN ENTRE PESO Y MASA

Debido a que nacemos y crecemos en un planeta de masa considerable, la propiedad más notable de los objetos a nuestro alrededor es su peso. Y utilizamos esta propiedad como una característica fundamental de los mismos. Así hablamos de nuestro peso, y del de nuestros semejantes y del peso de animales, objetos varios, etc. También cuando compramos algún alimento u otras mercaderías, utilizamos el peso como una medida de la cantidad de las mismas. Pero, por ejemplo en este último caso, ¿qué es lo que nos interesa de lo que estamos comprando? ¿Con qué fuerza lo atrae la Tierra? ¿O más bien la cantidad que nos entregan?

Pensemos cuál sería la situación sobre la superficie de la Luna, donde la gravedad es unas seis veces menor que en nuestro planeta. O a bordo de una nave espacial en órbita, donde es nula. En el primer caso, si utilizamos una balanza de resorte, el peso que acuse un objeto cualquiera será un sexto del que registraríamos en la Tierra y en el segundo, cualquiera sea el cuerpo, pequeño o enorme, la lectura será siempre cero. Sin embargo, si realizamos algún acto que involucre cambios de velocidad, los efectos serán como los que estamos acostumbrados a experimentar. Así, encontraremos una diferencia (dolorosa) entre patear una pelota de fútbol normal y una rellena de plomo...

Un último comentario sobre las diferencias entre los conceptos de peso y masa. Ya dimos una explicación de por qué el primero nos resulta mucho más familiar, mientras que el de masa requiere de un ejercicio mental, como ser trasladarnos a una nave espacial, para reforzar su comprensión. Hay, además otra razón que contribuye a la confusión al respecto y es que, en la vida diaria, utilizamos como unidad de fuerza una que tiene el *mismo nombre* (kilogramo) que la unidad del SI para la masa.

Tienen el mismo nombre pero significan cosas distintas ya que se refieren a diferentes magnitudes. El kilogramo que utilizamos para los pesos, a veces llamado kilogramo-fuerza, pertenece al sistema técnico de unidades, ya casi en desuso en el ámbito científico, pero que sobrevive en el comercio y en las cuestiones cotidianas. En ese sistema de unidades, la fuerza es una magnitud fundamental y la masa una derivada.

Como vimos, en el Sistema Internacional y en el Sistema Métrico Legal Argentino (SIMELA) la unidad fundamental es la de masa (kilogramo, kg) y la de fuerza (Newton, N) resulta derivada a través de la segunda ley de Newton.

Un Newton es la fuerza que, aplicada a una masa de un kilogramo, le provoca una aceleración de un metro sobre segundo, cada segundo.

Con lo que hemos visto hasta ahora, es suficiente para encontrar que la relación entre ambas unidades es:

$$1 N \cong 0,1 kg \text{ fuerza}$$

Ejercicio 3.8: Demuestre la igualdad aproximada de arriba.

EL CAMPO GRAVITATORIO

La Ley de Gravitación Universal nos obliga a aceptar que no es necesario que dos cuerpos estén en contacto para que su interacción origine algún tipo de fuerza. La gravedad es una fuerza que actúa a distancia y no es la única. Todos conocemos los imanes y hemos jugado alguna vez con sus extraños efectos.

Una forma particularmente potente de analizar las interacciones a distancia es introducir el concepto de *campo*. Aplicar esta idea a la interacción gravitatoria supone admitir que un cuerpo con masa "altera" de alguna forma el espacio que lo rodea, creando un *campo gravitatorio* que es el que transmite la interacción.

Dicho de otra manera, un campo gravitatorio es una región del espacio donde actúan fuerzas de ese origen, que serán "sentidas" por cualquier partícula con masa. Entonces el problema se divide en dos partes: Por un lado debemos calcular las características del campo creado por un cuerpo o un conjunto de ellos y luego la acción que ese campo tiene sobre otros cuerpos.

La *intensidad del campo gravitatorio en un punto* (E_G), se define como la fuerza por unidad de masa

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

y es numéricamente igual a la fuerza (F) que actuaría sobre una masa unitaria colocada en ese punto. La intensidad de campo es una magnitud vectorial que tiene la dirección y sentido de la fuerza actuante y que depende de la distribución en el espacio de las masas gravitatorias.

Veamos si la ley de Gravitación Universal nos sirve para calcular esta magnitud. Partamos del caso más sencillo correspondiente al campo gravitatorio producido por una masa puntual M , e imaginemos colocar otra masa de prueba m en un punto A , situado a una distancia r . El módulo de la fuerza de interacción será:

$$F = G \frac{m M}{r^2}$$

Entonces, la intensidad de campo la calculamos dividiendo la fuerza que actúa sobre la masa de prueba por el valor de esta masa:

$$E_G = \frac{F}{m} = \frac{G M}{r^2}$$

De lo expuesto, resulta que para calcular la fuerza que actúa sobre cualquier masa, ubicada en ese punto, sólo tenemos que multiplicar la magnitud del campo gravitatorio en ese punto por el valor de la masa en cuestión

$$F = m E_G$$

Aplicamos este resultado para calcular el campo gravitatorio creado por nuestro planeta (E_{GT}) en las cercanías de su superficie. En tal caso podemos escribir

$$E_{GT} = \frac{G M}{R^2}$$

donde M es la masa de la Tierra y R su radio.

Pero si repasamos nuestros resultados anteriores, veremos que el campo gravitatorio creado por nuestro planeta en las cercanías de su superficie tiene una intensidad que es nuestra vieja conocida aceleración de la gravedad g , es decir que $E_{GT} = g$, lo que otorga un nuevo significado a la relación hallada anteriormente entre peso y masa.

De este modo la intensidad del campo gravitatorio en un punto del espacio, puede interpretarse también como la aceleración que actuaría sobre una masa ubicada en ese lugar.

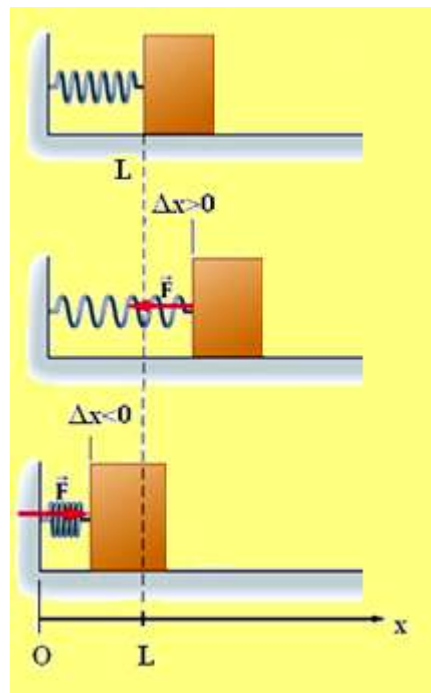
Ejercicio 3.9: En un satélite artificial en órbita terrestre, los objetos no tienen peso. ¿Significa esto que el campo gravitatorio es nulo allí?

FUERZAS ELÁSTICAS

Un tipo de interacción que aparece a menudo en la naturaleza, así como en diversos dispositivos mecánicos, es la debida a la fuerza elástica. El elemento mediador más conocido de este tipo de fuerza es el resorte o muelle elástico.

Los resortes están contruidos generalmente a partir de un arrollado metálico tratado térmicamente, aunque los hay de otros tipos de materiales y formas. Tienen la propiedad de retornar a su forma o longitud natural luego de ser estirados o comprimidos.

Cuando un resorte es apartado de su posición de reposo, dada por su longitud natural (L), genera una fuerza restitutiva que tiende a hacerlo volver a su posición de equilibrio. Esta fuerza, denominada fuerza elástica, fue estudiada por el científico inglés Robert Hooke (coetáneo de Newton) en el siglo XVII y formulada en la célebre ley que lleva su nombre, la cual describe el comportamiento de materiales elásticos lineales ante deformaciones longitudinales.



Fuerza elástica ante deformaciones del resorte

La Ley de Hooke establece que la fuerza elástica (F_e) es directamente proporcional a la elongación o compresión (Δx) producida.

$$F_e = -k \Delta x \quad \text{Ley de Hooke}$$

Donde k es la constante de elasticidad, que depende del resorte, y en el sistema internacional de unidades se expresa en unidades de N/m.

$\Delta x = x - L$, indica el alargamiento o acortamiento producido al resorte a partir de su longitud natural (L). El signo menos denota que la fuerza es restitutiva, es decir que

actúa en sentido contrario al de la deformación producida. Si se estira el resorte ($x > L$) la fuerza elástica tiende a contraerlo, en tanto que si se lo comprime ($x < L$) la fuerza elástica tiende a alargarlo.

Muchas veces suele tomarse el origen de coordenadas ($x=0$) en el extremo libre del resorte sin deformar, es decir en la posición L . De esta manera, la ley de Hooke puede escribirse como $F_e = -k x$, donde x es directamente el apartamiento respecto de la longitud natural del resorte.

Ejemplo

Se tiene un resorte de constante elástica $k = 100 \text{ N/m}$ cuya longitud natural es de 30 cm, suspendido de un soporte. ¿Cuál será su nueva longitud si se le cuelga una masa de 0,3 kg?

Una vez que colgamos la masa de 0,3 kg actuarán dos fuerzas sobre el resorte, el peso (P) de la masa (apuntando hacia abajo) y la fuerza elástica (F) generada por el resorte (apuntando hacia arriba, en sentido contrario al de la deformación producida).

El resorte se estirará hasta que la fuerza elástica se equilibre con el peso. A partir de la segunda ley de Newton, dado que el sistema está en equilibrio, con velocidad y aceleración nulas

$$F_e + P = m a = 0$$

Entonces

$$F_e = -P$$

Aplicando la ley de Hooke, tomando el eje x positivo hacia abajo (en el sentido en que se estira el resorte) es:

$$-k(x - L) = -(m g)$$

Por lo tanto

$$x = \frac{m g}{k} + L = \frac{0,3 \text{ kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{100 \frac{\text{N}}{\text{m}}} + 0,3 \text{ m} = 0,3294 \text{ m}$$

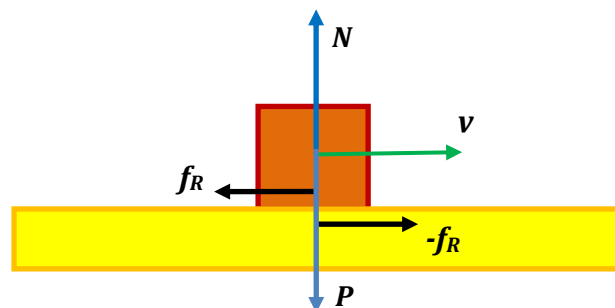
La nueva longitud del resorte será de 32,94 cm. Se habrá estirado 2,94 cm respecto de su longitud natural.

FUERZAS DE ROZAMIENTO

La primera ley de Newton nos indica que un cuerpo se moverá indefinidamente en línea recta, manteniendo su velocidad constante, a menos que alguna fuerza actúe sobre él. De esta manera un cuerpo al que demos un impulso para hacerlo deslizar sobre una superficie plana, debería seguir avanzando conservando su velocidad inicial constante, a menos que aparezca alguna fuerza.

La experiencia cotidiana nos dice que un cuerpo que desliza por un plano horizontal termina deteniéndose en algún instante si se lo deja de empujar. Esto es debido a la acción de una fuerza de fricción que se origina a causa del rozamiento entre las superficies en contacto. Si ampliáramos con un microscopio las superficies del plano y del cuerpo, veríamos que no son perfectamente lisas y están llenas de rugosidades que presentan resistencia al avance del cuerpo, produciendo un efecto macroscópico que se manifiesta como una fuerza de sentido contrario al del movimiento del cuerpo.

Estas fuerzas de rozamiento, como toda interacción y según lo establece la tercera ley de Newton, aparecen de a pares. Ambas fuerzas (acción y reacción) son paralelas a la superficie de contacto, una está aplicada sobre el cuerpo y su sentido es contrario al de su movimiento y la otra está aplicada sobre el plano y su sentido es el mismo que el del movimiento del cuerpo.



Fuerzas de rozamiento entre cuerpo y plano

La intensidad de la fuerza de rozamiento es función de los materiales de las superficies en contacto y de la componente del peso del cuerpo en dirección perpendicular a la superficie sobre la cual se está deslizando, de acuerdo con la siguiente fórmula

$$f_R = \mu N$$

donde μ es el coeficiente de rozamiento entre el cuerpo y el plano que, como dijimos, depende de los materiales en contacto y N es la fuerza de reacción del plano a la componente del peso del cuerpo en dirección perpendicular (normal) a la superficie de desplazamiento. En el caso de un plano horizontal, como en el caso del esquema anterior, N es igual y de sentido contrario al peso P del cuerpo.

El coeficiente de rozamiento μ es adimensional (es un número sin unidad) y tiene la característica de que presenta dos valores diferentes, uno para el caso estático (μ_E) y otro, menor, para el caso dinámico (μ_D). Es decir que si un cuerpo se encuentra en reposo sobre un plano horizontal, la fuerza que debe aplicarse para comenzar a moverlo es igual a la fuerza de rozamiento estático

$$f_{RE} = \mu_E N$$

En tanto que una vez que el cuerpo comience a deslizarse, la fuerza de rozamiento disminuirá a un valor dado por el rozamiento dinámico

$$f_{RD} = \mu_D N$$

En la tabla siguiente se muestran valores típicos para los coeficientes de rozamiento de algunos materiales.

Materiales en contacto	Coef. dinámico μ_D	Coef. estático μ_E
Acero sobre acero	0,57	0,74
Vidrio sobre vidrio	0,40	0,94
Madera sobre cuero	0,40	0,50
Cobre sobre acero	0,36	0,53
Goma sobre cemento seco	0,80	2,5
Goma sobre cemento mojado	0,25	0,30
Acero sobre hielo	0,06	0,10
Madera encerada sobre nieve	0,05	0,10

DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE

El diagrama de cuerpo libre constituye una herramienta muy útil al estudiar el estado de movimiento o equilibrio de un cuerpo en relación con las fuerzas que actúan sobre él. Básicamente se trata de realizar un esquema en el cual se dibujan todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, para hallar la aceleración a que está sometido.

De acuerdo con la segunda ley de Newton la fuerza neta que actúa sobre un cuerpo es la responsable de su aceleración, según la ecuación $F = m a$

De modo que si queremos determinar la aceleración de un cuerpo debemos encontrar cual es la fuerza neta que actúa sobre él y dividirla por el valor de su masa. Esta fuerza neta corresponde a la suma vectorial de todas las fuerzas externas intervinientes, de modo que una forma más explícita de esta segunda ley de Newton sería escribir

$$F = \sum_j F_j = m a$$

Lo cual, en el sistema de coordenadas cartesianas, corresponde a escribir una ecuación para cada uno de los tres ejes de coordenadas

$$F_x = \sum_j F_{jx} = m a_x$$

$$F_y = \sum_j F_{jy} = m a_y$$

$$F_z = \sum_j F_{jz} = m a_z$$

El diagrama de cuerpo libre se construye dibujando al cuerpo en cuestión aislado del resto, con su centro de masa (punto en el que podemos considerar concentrada toda la masa del objeto) en el origen de coordenadas, y representando todos los vectores de las fuerzas externas intervinientes dentro del mismo esquema.

El vector fuerza resultante es la suma vectorial de todas las fuerzas actuantes sobre el cuerpo, y será igual a producto de la masa del cuerpo multiplicada por su aceleración.

A modo de ejemplo consideremos el caso del ejemplo que se presenta a continuación.

Ejemplo

Un cuerpo de 3 kg de masa se desliza a lo largo de un plano inclinado con rozamiento, cuyo ángulo de inclinación es $\theta = 30^\circ$, bajo la acción de su propio peso. Su velocidad resulta ser constante e igual a 2 m/s. Se pide determinar el coeficiente de rozamiento dinámico μ_D entre las superficies en contacto.

Para resolver este problema es conveniente dibujar el diagrama de cuerpo libre del cuerpo, cumpliendo los siguientes pasos:

1. Aislar el cuerpo e identificar todas las fuerzas que actúan sobre él (pueden ser de contacto o debidas a interacciones a distancia).
2. Dibujar un sistema de coordenadas cartesianas con su origen en el centro de masa del cuerpo.
3. Dibujar los vectores que representan cada una de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, con sus puntos de aplicación en el centro de masa del cuerpo.
4. Hallar las proyecciones de las fuerzas sobre cada uno de los ejes cartesianos.
5. Plantear para cada uno de los ejes cartesianos la ecuación correspondiente a la segunda ley de Newton.

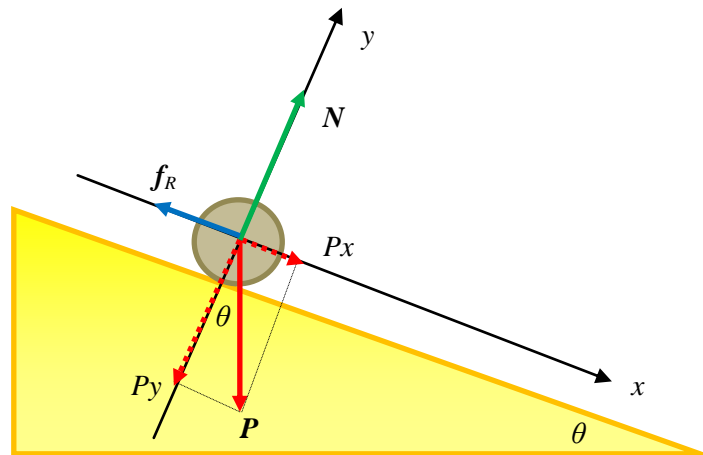


Diagrama de cuerpo libre para plano inclinado con rozamiento

Las fuerzas que actúan sobre el cuerpo que se desliza sobre el plano inclinado son su peso $\mathbf{P} = m \mathbf{g}$, la fuerza de contacto perpendicular al plano (o normal) \mathbf{N} , que el plano ejerce sobre el cuerpo y la fuerza de rozamiento entre las superficies del cuerpo y el plano \mathbf{f}_R , contraria al movimiento, o sea al vector velocidad del cuerpo.

Elegimos el sistema de coordenadas de modo que el eje x sea paralelo al plano y en el sentido del movimiento, y el eje y perpendicular al mismo.

Realizamos ahora las proyecciones de la fuerza peso $\mathbf{P} = m \mathbf{g}$ sobre el eje cartesiano “ x ” ($P_x = P \sin(\theta)$) y sobre el eje cartesiano “ y ” ($P_y = P \cos(\theta)$).

Planteamos la segunda ley de Newton sobre cada eje de coordenadas, resultando

Sobre el eje “ y ”:

No hay movimiento, es decir la velocidad en y v_y es siempre 0, por lo que su aceleración es nula, entonces

$$\begin{aligned} N - P_y &= m a_y = 0 \\ N &= P_y = m g \cos(\theta) \end{aligned}$$

Sobre el eje “ x ”:

El cuerpo se mueve con velocidad constante de 2 m/s, por lo que al no haber cambios en la velocidad v_x , su aceleración es nula, entonces

$$P_x - f_R = m a_x = 0$$

Siendo

$$P_x = f_R$$

$$m g \operatorname{Sen}(\theta) = \mu_D N$$

Reemplazando ahora por el valor de N obtenido en la ecuación sobre el eje “y”, es

$$m g \operatorname{Sen}(\theta) = \mu_D m g \operatorname{Cos}(\theta)$$

De donde el coeficiente de rozamiento dinámico resulta ser:

$$\mu_D = \frac{\operatorname{Sen}(\theta)}{\operatorname{Cos}(\theta)} = \operatorname{tg}(\theta) = \operatorname{tg}(30^\circ) = 0,577$$

RESUMEN

FUERZA. Las fuerzas son *siempre* el resultado de la interacción de dos o más cuerpos, produciendo sobre éstos cambios de velocidad y/o de forma. La segunda ley establece que la aceleración es directamente proporcional a la fuerza e inversamente a la masa del cuerpo. Aparece una fuerza sobre cada cuerpo en interacción, siendo fuerzas iguales y opuestas. La ley de gravitación universal establece que todo cuerpo del Universo atrae a cualquier otro con una fuerza que es directamente proporcional al producto de las masas de ambos cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. En el SI la fuerza se mide en Newton, cuya definición surge de la segunda ley. Por razones históricas todavía utilizamos, en la vida diaria, una unidad llamada kilogramo (fuerza), que no debe confundirse con la unidad de masa del SI.

CAÍDA LIBRE. PESO Y MASA. El peso, que es el nombre que le damos al resultado de la interacción gravitatoria con la Tierra, es directamente proporcional a la masa, siendo la constante de proporcionalidad, la intensidad del campo gravitatorio, a la que llamamos g , y también *aceleración debida a la gravedad*. Como los campos gravitatorios varían generalmente con la posición, el peso resulta una magnitud menos fundamental que la masa, la cual es mucho más invariante. En las cercanías de la superficie terrestre y en ausencia de otras interacciones, todos los cuerpos caen con MUV en el que la aceleración vale $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Los cuerpos en movimiento de caída libre, que tienen un componente horizontal en su velocidad, describen trayectorias parabólicas, características de los proyectiles.

EL CAMPO GRAVITATORIO. En una región del espacio donde existe un campo gravitatorio actuarán fuerzas de ese origen sobre los cuerpos que se encuentren allí. La intensidad de campo gravitatorio en un punto es numéricamente igual a la fuerza que actuaría sobre un cuerpo de masa unitaria, colocado en ese punto.

FUERZA ELÁSTICA. Es una fuerza de contacto relacionada con las interacciones producidas por los resortes. Está descrita por la ley de Hooke que establece que la fuerza elástica es directamente proporcional al apartamiento del resorte de la posición correspondiente a su longitud natural.

FUERZA DE ROZAMIENTO. Es una fuerza que aparece entre las superficies de contacto entre dos cuerpos. Depende del tipo de materiales de ambos cuerpos y es proporcional a la fuerza de contacto entre ellos.

DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE. Constituye una herramienta para estudiar el estado de movimiento o equilibrio de un cuerpo en relación con las fuerzas que actúan sobre él. Básicamente se trata de realizar un esquema en el cual se dibujan todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, para hallar la aceleración a que está sometido.

RESPUESTAS A LOS EJERCICIOS

1: Porque es imposible aislar los cuerpos de las interacciones y lo más común es que prevalezca un estado de desequilibrio.

2: 267 N; mayor, porque forzosamente hay fricción.

3: Podría decirse que sí, las ruedas empujan el piso hacia atrás y la reacción del piso sobre las ruedas es hacia delante.

4: $3,67 \times 10^{-7} \text{ N}$; $3,67 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$, absolutamente despreciables.

5: Aproximadamente 9,8 m/s.

6: 8 metros, que es la distancia horizontal que recorre en el tiempo que tarda en caer hasta el suelo.

7: La trayectoria sería una recta inclinada hacia abajo; porque la interacción con el aire (rozamiento) aumenta con la velocidad y después de un cierto tiempo (teóricamente infinito), llega a ser igual y contraria al peso.

8: Un cuerpo de masa de 1kg pesa en el sistema técnico 1kg(f), mientras que, en Newton, su peso será:

$$P = m g = 1 \text{ kg } 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,8 \text{ N}$$

9: Evidentemente no. Los satélites artificiales se mueven a una pequeña distancia de la Tierra y allí el campo gravitatorio, aunque menor, no es demasiado distinto del de la superficie. Hay otras razones para esa aparente ingravidez. Pensar, por ejemplo, en lo que sucedería en un ascensor cuyos cables se corten e inicie una caída libre. Los cuerpos dentro del ascensor experimentarían una sensación de ingravidez mientras dure la caída.