CAPÍTULO 3.   LEYES DE NEWTON Y APLICACIONES (I)

3.1   LAS LEYES DE NEWTON DEL MOVIMIENTO

Isaac Newton formuló y desarrolló una potente teoría acerca del movimiento, según la cual las fuerzas que actúan sobre un cuerpo producen un cambio en el movimiento de dicho cuerpo. Newton basó su teoría en unos principios que conocemos como las tres leyes de Newton del movimiento y mostró cómo su aplicación coherente, asociada a leyes de fuerzas como su propia ley de Gravitación Universal, daba cuenta satisfactoria de muchos movimientos importantes, tanto de cuerpos celestes como planetas, cometas y satélites, como de objetos de toda suerte en la tierra.

La teoría newtoniana del movimiento es, sin duda, uno de los más notables logros del pensamiento humano.   Interesa a físicos, a ingenieros que cotidianamente la aplican, a filósofos, a historiadores. La teoría newtoniana ha sido presentada en términos matemáticos que han evolucionado con los tiempos y su aplicación se ha extendido a una inaudita variedad de movimientos.   Algunos de sus conceptos, como el espacio, el tiempo, la inercia, la fuerza, plantean interrogantes profundos y complejos acerca de la naturaleza del mundo físico.   El estudio de la teoría newtoniana del movimiento se conoce como Mecánica Newtoniana o Mecánica Clásica, aunque este último nombre suele denotar formulaciones matemáticas alternas, muy elaboradas.

El propósito de este texto es presentar las leyes de Newton de manera simple, usando una notación matemática moderna, sin ahondar en los problemas epistemológicos, enfocando la atención hacia la enseñanza de su aplicación coherente y ordenada, comenzando con movimientos sencillos, lo que permitirá al estudiante atento adquirir prontamente destreza y confianza en la aplicación y comprensión de una teoría, de un modelo físico-matemático.

Primera ley de Newton. Ley de inercia

"Todo cuerpo permanece en su estado de reposo, o de movimiento uniforme en línea recta, excepto si sobre él actúan fuerzas".   De modo muy similar enunció Newton su primera ley. En otros términos, podríamos decir: "Un cuerpo sobre el cual no actúan fuerzas, se mueve con $\vec{v}$ constante".   "No actúan fuerzas" quiere decir que la fuerza neta o resultante es nula y así, sobre el cuerpo pueden actuar varias fuerzas pero su suma vectorial es cero.   Si el vector velocidad es constante, su dirección es constante y el movimiento es rectilíneo, y su magnitud también y el movimiento es uniforme. El reposo es sólo un caso particular, $\vec{v} = 0$.   Más aún, al hablar de una única velocidad, se está hablando de un cuerpo puntual, de una partícula. Pero la dificultad, el punto crucial de la primera ley está en esto: ¿respecto a cuál marco de referencia se mide esa velocidad? Y éste es un serio problema, ya que un mismo cuerpo puede estar en reposo respecto a un cierto marco de referencia y moviéndose aceleradamente respecto a otro y entonces, ¿en cuál marco se aplica la primera ley?, pues en uno se cumpliría y en el otro no.   Una aguda y jocosa paráfrasis de la primera ley debida a Sir Arthur Eddington y citada por A.P. French en su notable "Mecánica Newtoniana", muestra el problema: "Todo cuerpo continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, excepto si no lo hace". En efecto, mientras no se indique el marco de referencia, ¿qué dice la primera ley?

Suele aceptarse que el contenido real de la primera ley es la aseveración de la existencia de unos marcos de referencia especiales, llamados marcos inerciales de referencia, que son precisamente los marcos de referencia en los cuales se cumple la ley de inercia. Un enunciado de la primera ley podría ser algo así: Existen ciertos marcos de referencia, llamados inerciales, respecto a los cuales un objeto, sobre el cual la fuerza neta es nula, se mueve con $\vec{v}$ constante.

Del concepto de velocidad relativa puede verse inmediatamente que si un determinado marco de referencia es inercial, cualquier otro marco que se traslade con vector velocidad constante respecto al primero, será también inercial. Consideremos, por ahora, un marco de referencia fijo a la superficie terrestre como inercial y pensemos en el siguiente experimento, realizado en una edificación. Sobre una "mesa de aire" perfectamente nivelada y horizontal, que tiene una serie de perforaciones por las que sale aire comprimido, se coloca un pequeño disco, de modo que queda "flotando" en un colchón de aire, reduciendo prácticamente por completo los efectos de la fricción o rozamiento. La fuerza de atracción terrestre o peso del disco se ve compensada por la fuerza de sustentación del colchón de aire y podemos considerar entonces que la fuerza neta sobre el disco es nula. Si colocamos el disco en reposo, permanecerá en reposo; si lo lanzamos deslizando por la mesa con una cierta velocidad, permanecerá en movimiento rectilíneo con esa velocidad (¡hasta que llega al borde de la mesa, en cuyo caso intervienen fuerzas que cambian su $\vec{v}$!). Esa es la ley de inercia, pensada en experimentos locales, como generalización de los cuales la había concebido inicialmente Galileo.

Ahora, traslademos mentalmente esa mesa de experimentos a un tren, a un avión, a un barco, que se mueven respecto al marco, supuesto inercial y fijo a tierra, con movimiento rectilíneo uniforme, sin curvas ni sobresaltos. Pues bien, en esos nuevos marcos de referencia, tren, avión o barco, los experimentos son idénticos. Si el disco se coloca en reposo sobre la mesa lisa, en reposo permanece, la ley de inercia se cumple, esos marcos son también inerciales. Pero no sólo esos experimentos, cualquier movimiento se realiza idénticamente en todos ellos, sea la oscilación de un péndulo, la vibración de una cuerda o la colisión de dos esferas. Los marcos inerciales de referencia son indistinguibles. Las leyes de la mecánica son las mismas en todos ellos. Esta proposición se conoce como el Principio de Relatividad, válido en la mecánica clásica, y que adquirirá mayor amplitud y relieve en la Teoría de la Relatividad.

Pero si el tren frena, acelera o da una curva, el disco de nuestro experimento pensado no permanecerá en reposo, se moverá hacia delante, hacia atrás o hacia un lado, no porque fuerzas misteriosas de interacción con otros cuerpos lo muevan, sino porque el marco de referencia es no-inercial, en él ya no es válida la ley de inercia.

La hipótesis de que el marco fijo a la superficie terrestre es inercial, es sólo aproximadamente cierta. La tierra rota y ese marco tiene entonces una pequeña aceleración, que podemos despreciar en muchísimos casos, pero que revelarán experimentos de precisión como el célebre péndulo de Foucault. Pero aunque la tierra no rotase, no sería un marco perfectamente inercial debido a su movimiento alrededor del sol. Un marco de referencia ligado al sol y a las estrellas, llamado a veces marco Copernicano, es una mejor aproximación a un marco inercial, pero el sol también se mueve en la galaxia.... y entonces? Hay en los marcos inerciales interrogantes profundos, pero ahora no discutiremos esas materias y usaremos un concepto sencillo, diciendo que un marco de referencia es inercial cuando en él se cumple, con un cierto grado de aproximación experimental, la ley de inercia.

Segunda ley de Newton

Si estamos en un marco inercial de referencia y sobre un cuerpo puntual o partícula no actúa fuerza neta, el cuerpo se moverá con $\vec{v}$ constante. Tal es, pues, la ley de inercia. Y entonces, si sobre el cuerpo actúan fuerzas, su velocidad cambiará, habrá una aceleración. La segunda ley de Newton del movimiento establece la relación entre la fuerza resultante que actúa sobre el cuerpo y su aceleración, introduciendo el concepto de masa inercial del cuerpo. Enunciemos la ley de una manera que, si bien no es la original del propio Newton, es equivalente a ella.

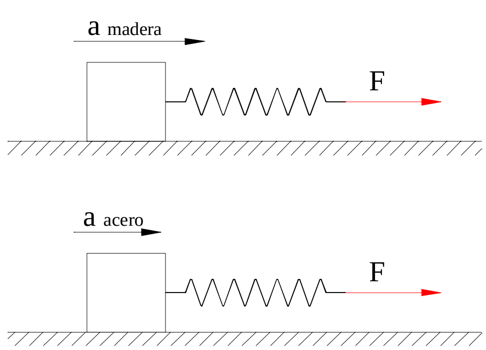
Si escribimos $\sum \vec{F}$ como la suma vectorial de **todas** las fuerzas **que actúan sobre** el cuerpo y m como la masa inercial, que llamaremos simplemente masa, la segunda ley se escribe,

$$\boxed{\sum \vec{F} = m\,\vec{a}} \qquad \text{respecto a un marco inercial de referencia.}$$

Los cuerpos materiales tienen la propiedad de que, para modificarles su $\vec{v}$, es necesario ejercer una fuerza sobre ellos. Esa propiedad es la que se conoce como la inercia de los cuerpos. Ahora, para producir el mismo cambio en $\vec{v}$, es decir la misma $\vec{a}$, en dos cuerpos diferentes, las fuerzas que hay que ejercer sobre ellos son diferentes, debido a que tienen masas inerciales diferentes. Imaginemos la siguiente situación: dos bloques de igual tamaño vienen deslizándose por una superficie lisa con la misma velocidad, uno de madera y el otro de acero. Las fuerzas necesarias para detener en el mismo tiempo los bloques, son muy diferentes, pues el bloque de acero tiene una masa mucho mayor que el de madera. La relación cuantitativa precisa la proporciona la segunda ley. En efecto, si $\left|\vec{a}_{acero}\right| = \left|\vec{a}_{madera}\right|$,

$$\frac{\left|\vec{F}_{acero}\right|}{\left|\vec{F}_{madera}\right|} = \frac{m_{acero}}{m_{madera}} \ .$$

La otra manera de pensar lo que es la masa inercial, de acuerdo a la segunda ley, es ésta: imaginemos los dos mismos bloques sobre la superficie lisa, jalados desde el reposo con la misma fuerza, lo que podría lograrse dándole el mismo estiramiento a un resorte.



En ese caso, la aceleración del bloque de acero será mucho menor. La relación, de acuerdo a la segunda ley, es,

$$\frac{|\vec{a}_{acero}|}{|\vec{a}_{madera}|} = \frac{m_{madera}}{m_{acero}} \ .$$

Las fuerzas que figuran en la segunda ley provienen de las interacciones del cuerpo con los demás cuerpos de su entorno. Son cantidades vectoriales y se suman como tales. La aceleración de un cuerpo la determina pues la resultante o suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre él, y esas fuerzas son siempre hechas o ejercidas por algún otro cuerpo o trozo de materia. La aplicabilidad y utilidad de la segunda ley se basa en que las fuerzas que figuran en ella son únicamente de unas cuantas clases como veremos luego.

Tercera ley de Newton. Ley de acción y reacción

Como dijimos, las fuerzas que figuran en la segunda ley provienen de interacciones entre cuerpos. Este hecho fundamental se hace explícito en la tercera ley de Newton. Podemos enunciarla diciendo: si un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro, este último ejerce sobre el primero una fuerza de igual magnitud y dirección contraria. Sean los cuerpos puntuales 1 y 2. Llamemos

$\vec{F}_{12}$:	fuerza	sobre	cuerpo 1
		hecha por	cuerpo 2
$\vec{F}_{21}$:	fuerza	sobre	cuerpo 2
		hecha por	cuerpo 1.

La tercera ley afirma que

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

Podemos representarla en un dibujo de la siguiente manera, teniendo en cuenta que se representan siempre en un cuerpo las fuerzas hechas sobre él:

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

Esta denotación plena de los vectores es útil e importante. Sin embargo, en las representaciones gráficas de muchos problemas concretos es muy conveniente usar una denotación más sencilla, así:

denotando únicamente la magnitud de las fuerzas, dado que sus direcciones ya están señaladas con las flechas.

Las fuerzas de interacción existen siempre en parejas. Son fuerzas entre dos cuerpos, una fuerza sobre uno de ellos y otra, de igual magnitud y dirección contraria, sobre el otro. A veces se dice: a toda acción corresponde una reacción igual en magnitud y de sentido contrario. Cuál sea la acción y cuál la reacción, es indiferente. Lo esencial es la pareja. Pero hay que tener completamente claro que esas dos fuerzas de la pareja acción-reacción actúan siempre sobre dos cuerpos diferentes. Jamás aparecerán juntas en el diagrama de fuerzas de un cuerpo.

Siempre que se va a estudiar el movimiento de un cuerpo con la segunda ley de Newton, válida sólo respecto a un marco inercial de referencia, y se establecen las fuerzas hechas sobre dicho cuerpo, es necesario saber con precisión por cuáles otros cuerpos externos, es decir por cuáles trozos de materia, son hechas o ejercidas tales fuerzas.

Las leyes de Newton describen el movimiento de cuerpos puntuales o partículas. Uno de los modelos físico-matemáticos básicos de la mecánica clásica, como ya lo habíamos dicho, es el de **partícula o punto material**, punto geométrico con masa, modelo que ha surgido como idealización de cuerpos cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con sus desplazamientos, o bien cuya estructura y movimientos internos no son relevantes para un determinado estudio. Un mismo cuerpo puede ser considerado como una partícula para estudiar ciertos movimientos pero no para otros. Por ejemplo, un bloque rectangular que desliza por una superficie horizontal puede ser representado como una partícula, pero ese modelo no es adecuado si quieren estudiarse las condiciones de volcamiento del mismo bloque en un plano inclinado, pues aquí la rotación es esencial y una partícula, un punto, no rota. El planeta tierra puede ser representado como una partícula para estudiar su movimiento de traslación alrededor del sol, pero no para estudiar la rotación diaria alrededor de su propio eje. No se trata pues de saber si un cuerpo es o no una partícula o punto material. No lo es. Las partículas son construcciones de la mente, son modelos abstractos. El problema está en saber si un cuerpo en determinadas condiciones puede ser adecuadamente representado como una partícula.

Luego veremos que, gracias a la tercera ley, es posible extender con facilidad la segunda ley a conjuntos o sistemas de partículas y a cuerpos extensos.

3.2 INTERACCIONES Y TIPOS DE FUERZAS

El estudio de la materia hecho por la física ha mostrado que las interacciones pueden reducirse a unas cuantas clases, llamadas interacciones fundamentales: La interacción gravitacional, la electromagnética y las interacciones denominadas fuerte y débil.

La interacción gravitacional se presenta entre todos los cuerpos del universo, que se atraen entre sí con fuerzas gravitacionales. Las fuerzas de atracción gravitacional entre cuerpos pequeños, como aquellos con los que se experimenta en un laboratorio de mecánica, son sumamente pequeñas. Las fuerzas de interacción gravitacional son primordiales en el movimiento de sistemas astronómicos, por la gran masa de algunos cuerpos involucrados y porque otros tipos de fuerzas están prácticamente ausentes. La interacción gravitacional es determinante en el movimiento de satélites, de planetas, de cometas, de estrellas. A nivel inmediato, cotidiano, se manifiesta en la fuerza de atracción gravitacional hecha por el planeta tierra sobre los cuerpos, que no es otra cosa que el peso de esos cuerpos.

La interacción electromagnética se da entre cuerpos o partículas cargadas eléctricamente, y aquí nos referimos, no a las "partículas" como modelo de la mecánica clásica, sino a las partículas elementales de la física moderna como electrones, protones, en fin, constituyentes de los átomos a nivel microfísico. A diferencia de la interacción gravitacional en la que sólo hay una clase de masa y las fuerzas son siempre atractivas, hay dos clases de cargas eléctricas, positiva y negativa, y las fuerzas pueden ser atractivas o repulsivas. Las dos clases de carga permiten que en muchísimos casos los cuerpos estén balanceados eléctricamente y así globalmente no hay interacción electromagnética neta, lo que ocurre tanto en pequeña escala con cuerpos de la vida cotidiana, como a escala astronómica en la que prima la interacción gravitacional. Pero en muchos casos, la interacción electromagnética, comprendida con exactitud y controlada con precisión, es de enorme importancia, como lo demuestra la gran cantidad de equipos, instrumentos y artefactos eléctricos, magnéticos, electrónicos, esenciales en la vida moderna de los hombres. Además, la luz, la decisiva luz, es un fenómeno electromagnético: es una onda electromagnética. A nivel microfísico, intermolecular, la interacción electromagnética es la responsable de los procesos químicos, de la cohesión, resistencia y elasticidad de los cuerpos. Si un bloque reposa o desliza sobre una mesa, lo que llamamos contacto desde un punto de vista macroscópico, no es otra cosa en el microcosmos que una miríada de interacciones intermoleculares electromagnéticas de proximidad, y no de contacto, que a ese nivel no existe. Las interacciones microfísicas que mantienen unidos entre sí los trozos de una cuerda tensa, son intermoleculares, electromagnéticas. En general, pues, las fuerzas comunes, macroscópicas, de la mecánica newtoniana, como las fuerzas de contacto entre sólidos, normal y fricción; las tensiones en las cuerdas; las fuerzas elásticas en resortes o en el interior de cuerpos sólidos o fluidos, son fuerzas cuyo origen microfísico es intermolecular, electromagnético, pero cuya descripción a ese nivel sería enormemente compleja. Por eso esas fuerzas de contacto de la mecánica, que, además de la fuerza de atracción gravitacional, conforman un vasto panorama de aplicaciones, son tratadas de manera global, muchas veces experimental, sin remitirse a su origen microscópico. Daremos luego descripciones cuantitativas precisas de esas fuerzas.

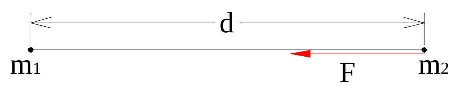
La interacción gravitacional entre objetos distantes, por ejemplo entre la tierra y la luna, ha sido tratada clásicamente como una "fuerza a distancia", sin preocuparse por los problemas de su "transmisión" de un punto a otro. Innumerables aplicaciones pueden trabajarse así de manera consistente, y eso haremos. Sin embargo, el punto de vista moderno se ha modificado, introduciendo el concepto de **campo**: una masa, como la tierra, produce en el espacio circundante, un campo gravitacional y la fuerza sobre la luna resulta de la acción de ese campo sobre ella. En las aplicaciones de la mecánica newtoniana es posible trabajar sin apelar al concepto de campo gravitacional, pero en la interacción electromagnética eso no es posible. Allí el concepto de campo es totalmente esencial.

Las interacciones nucleares son responsables de los procesos a nivel del núcleo atómico. La interacción fuerte, vinculada con la cohesión de los núcleos atómicos, es una interacción de enorme intensidad y muy corto alcance. Es fundamental en la física moderna al estudiar la materia a nivel de sus constituyentes últimos. Es responsable, por ejemplo, de la gran producción de energía de las estrellas. Otra interacción, llamada débil, está vinculada con ciertos procesos radiactivos. Al nivel macroscópico de la mecánica newtoniana, las interacciones nucleares no tienen incidencia directa en el movimiento de los cuerpos.

Al desarrollar las aplicaciones de las leyes de Newton, en el estudio que se suele llamar dinámica de una partícula, presentaremos las fuerzas de la mecánica: la fuerza gravitacional y las diversas fuerzas de contacto.

3.3 FUERZA DE ATRACCIÓN GRAVITACIONAL. EL PESO

Además de las leyes del movimiento, otro hallazgo fundamental de Newton es el de la **Ley de la Gravitación Universal**: dos partículas se atraen mutuamente con una fuerza en la dirección de la línea que las une y cuya magnitud es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.



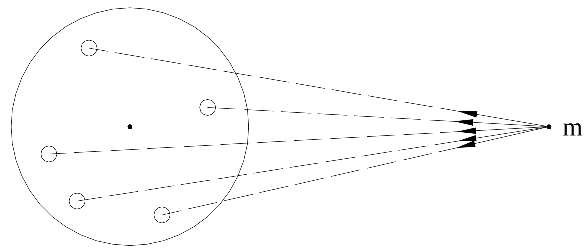
$$\boxed{F = \frac{G\, m_1\, m_2}{d^2}}$$

Hemos dibujado la fuerza hecha sobre m_2 por m_1. De acuerdo a la tercera ley, hay, por supuesto, otra fuerza de igual magnitud y dirección contraria hecha sobre m_1 por m_2. La constante G, llamada la Constante Gravitacional, fue determinada la primera vez por Henri Cavendish en 1771 usando una balanza de torsión, y su valor moderno es

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{N.m^2}{kg^2} .$$

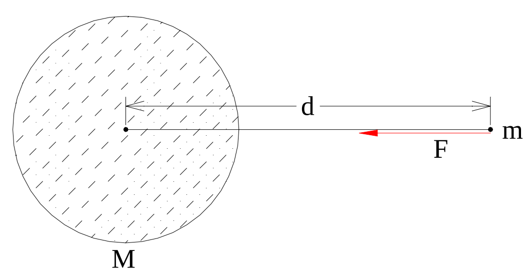
Con este valor de G puede verse que la fuerza gravitacional entre objetos pequeños es muy débil. Esa fuerza es notable cuando hay cuerpos muy masivos, como por ejemplo, el planeta Tierra.

Pero la ley de gravitación según hemos visto, se aplica a partículas. ¿Cómo hacer para calcular la fuerza de atracción gravitacional ejercida por un cuerpo extenso, tal como el planeta tierra? En principio, la manera de hacerlo es la siguiente:



Se divide el cuerpo extenso en pequeños trozos que pueden ser considerados prácticamente como partículas; se calcula con la ley de gravitación la pequeña fuerza hecha por cada trozo sobre una partícula de masa m; se suman vectorialmente todas esas pequeñas fuerzas y la resultante, en el límite cuando se cubre todo el cuerpo extenso, será la fuerza gravitacional ejercida sobre la partícula de masa m. Matemáticamente el procedimiento equivale a hacer una integración sobre todo el cuerpo extenso.

El caso más importante es, sin duda, el de una esfera, pues muchos cuerpos grandes, importantes, son muy aproximadamente esféricos, como el sol, los planetas y muchos satélites naturales. El resultado, debido otra vez a Newton, es de una sencillez asombrosa. No haremos ahora la deducción, pero enunciaremos y usaremos el bello resultado.



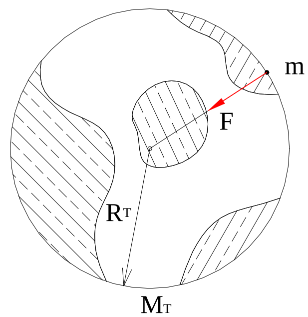
Una esfera tiene masa total M. Esta masa no tiene que estar uniformemente distribuida en la esfera, basta con que la densidad tenga simetría esférica, es decir sólo dependa del radio. En términos simples, la esfera maciza puede estar formada por capas o caparazones esféricos de diferente material, como en el caso de la tierra.

La fuerza de atracción gravitacional hecha por la esfera sobre una partícula de masa m que se encuentra a una distancia d del centro de la esfera, está dirigida hacia dicho centro y su magnitud es

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

es decir, es igual a la fuerza de atracción que ejercería una partícula de masa M, igual a la de la esfera, y localizada en su centro.

Consideremos ahora un cuerpo (partícula) de masa m situado muy cerca de la superficie terrestre y usemos el resultado anterior para calcular la fuerza de atracción ejercida por la tierra sobre m.



Sean M_T y R_T la masa y radio de la tierra, cuyos valores aproximados son

$$M_T = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_T = 6.37 \times 10^6 \text{ m} = 6370 \text{ km}.$$

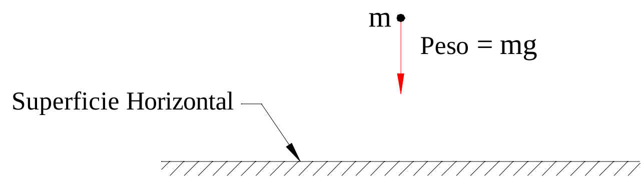
La fuerza de atracción gravitacional hecha por el planeta tierra sobre un cuerpo (puntual) de masa m, situado cerca de su superficie, que definiremos como el **peso** de dicho cuerpo, es una fuerza dirigida hacia el centro de la tierra y cuya magnitud es

$$F = \frac{G\, M_T\, m}{{R_T}^2} = m\, g,$$

siendo g la magnitud de la aceleración de la gravedad. Tendremos entonces

$$g = \frac{G\, M_T}{{R_T}^2}.$$

Visto localmente, el peso de un cuerpo puntual es pues una fuerza vertical hacia abajo, de magnitud $m\,g$.



Más adelante, al presentar el concepto de centro de gravedad, estudiaremos el peso de los cuerpos extensos.

La definición de peso que hemos dado es inequívoca. Si un cuerpo está lejos de la superficie terrestre, por ejemplo un satélite, no hablaremos del peso “allá” del satélite, sino de la fuerza de atracción gravitacional hecha por la tierra sobre el satélite en esa posición, lo que es totalmente preciso.

Con esa definición, el peso de un cuerpo no depende de que esté en reposo o moviéndose respecto a tierra. La aceleración de la gravedad g que establecimos, es la aceleración de caída de un cuerpo, sin fricción con el aire, respecto a un observador que no rote con la tierra. La aceleración de la gravedad medida por un observador anclado en la tierra y rotando con ella, aceleración aparente de la gravedad, tiene un valor levemente diferente y varía con la latitud desde el ecuador terrestre hasta los polos. Hay también variaciones debidas al hecho de que la tierra no es completamente esférica sino que tiene un pequeño achatamiento en los polos, debido precisamente a su rotación. Unos valores aproximados de g son.

$$g_{\text{ecuador}} = 9.78 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$g_{\text{polos}} = 9.83 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Hemos llamado **masa inercial** a la masa de un cuerpo que aparece en la segunda ley de Newton y que se manifiesta en la mayor o menor dificultad para imprimirle al cuerpo un determinado cambio a su vector velocidad. La masa de un cuerpo que figura en la ley de gravitación universal es, en principio, una cantidad conceptualmente independiente y diferente, que podemos llamar **masa gravitacional**. Si llamamos m_i a la masa inercial y m_g a la masa gravitacional de un cuerpo, la segunda ley de Newton aplicada a un cuerpo en caída libre bajo la atracción gravitacional será

$$\left(\frac{G \ M_T}{R_T^{\ 2}} \right) m_g = m_i \ g \ ,$$

y entonces la aceleración de la gravedad será

$$g = C\left(\frac{m_g}{m_i}\right)$$

donde C es una constante que depende del planeta tierra. Ahora bien, la ley de Galileo establece que todos los cuerpos caen con la misma aceleración g y por tanto la relación entre masa gravitacional y masa inercial tiene que ser la misma para todos los cuerpos, de modo que, eligiendo adecuadamente las unidades,

$$\frac{m_g}{m_i} = 1, \quad \text{o sea,} \quad m_g = m_i$$

para todos los cuerpos. Con inmensa, enorme precisión experimental, se ha comprobado que las masas inercial y gravitacional de un cuerpo son iguales, ¡pero no hay una razón de fondo para ello!, es una coincidencia en la Mecánica Clásica y uno de sus enigmas más acuciantes. Hay que esperar hasta el principio de equivalencia de Einstein para dar una razón de esa igualdad.

Hecha esta aclaración, llamaremos simplemente masa de un cuerpo bien sea a su masa inercial o gravitacional.

La masa es una característica que no depende de la localización del cuerpo. Una determinada piedra tiene una masa única y bien establecida, así se encuentre en el subsuelo, en la superficie terrestre, en una nave espacial o en la luna. El peso, en cambio, es una fuerza local. El peso de esa piedra es la fuerza hecha sobre ella por la tierra cuando está en un punto de su superficie. Cuando la piedra esté en la nave espacial, habrá otra fuerza de atracción hecha por la tierra sobre ella, pero ya no la llamaremos el peso.

3.4 FUERZA: DIMENSIONES Y UNIDADES

En un sistema de unidades cuyas cantidades o magnitudes físicas fundamentales son longitud, masa y tiempo, las dimensiones de la fuerza, de acuerdo a la segunda ley de Newton son

$$\text{dimensión de } F = [F] = M[a] = M\,L\,T^{-2}.$$

La unidad de fuerza en el Sistema Internacional, SI, es el Newton, abreviado N:

$$1\,N = 1\,kg\ m\ s^{-2}\ .$$

Como el peso es una fuerza cotidiana muy importante, hay unidades de fuerza basadas en el peso. Así un **kilogramo–fuerza**, escrito kgf, es una unidad de fuerza que se define como el peso de un cuerpo cuya masa es un kilogramo. Como vimos,

$$\text{Peso} = m\,g,$$

y por tanto,

$$1\ \text{kgf} = 1\ \text{kg} \times \text{aceleración de la gravedad}.$$

El problema es ¿cuál aceleración de la gravedad, en cuál lugar? Por convenio internacional se toma el valor de la llamada aceleración normal de la gravedad,

$$g_{\text{normal}} = 9.80665\ \text{m}\,\text{s}^{-2},$$

con lo que,

$$1\ \text{kgf} = 9.80665\ \text{N}.$$

Usualmente trabajamos con valores aproximados, $g \approx 9.81\ \text{m s}^{-2}$, y a menudo $g \approx 9.8\ \text{m}\,\text{s}^{-2}$, y entonces

$$1\ \text{kgf} \approx 9.8\ \text{N}.$$

El kilogramo–fuerza es una unidad de fuerza que tiene cierto uso técnico y mucho uso informal y hay que comprenderla bien. Si se pregunta a una persona por su propio peso, probablemente responderá algo como “60 kilos”. Pues bien, son 60 kgf, con lo que su masa son 60 kg y su peso, en SI, en Newtons, es

$$60\ \text{kg} \times 9.8\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 588\ \text{N}.$$

Ciertos problemas de equilibrio, de estática, pueden tratarse consistentemente en kgf, pero en dinámica, lo actual, lo correcto, lo prudente, es trabajar en unidades SI.

Sin embargo, hay textos valiosos de mecánica que usan diversos sistemas de unidades. Algunos tienen como magnitudes fundamentales longitud, masa y tiempo: L M T, y en ellos la fuerza es una magnitud derivada. Otros, llamados sistemas técnicos o gravitatorios, usan como magnitudes fundamentales longitud, fuerza y tiempo: L F T, y en ellos la masa es una magnitud derivada. Como simple referencia para facilitar la consulta de diversos libros de mecánica daremos las dimensiones y unidades básicas de algunos sistemas.

Sistema L M T

Fundamentales	SI	c.g.s.		
L	m	cm	Pie	ft
M	kg	g	libra masa	lbm
T	s	s	s	s
Derivada				
F	newton	dina	poundal	
$[F] = M L T^{-2}$	$1\ \text{N} = \text{kg m s}^{-2}$	$1\ \text{dina} = 1\ \text{g cm s}^{-2}$	$1\ \text{poundal} = 1\ \text{lbm ft s}^{-2}$	

Sistema L F T

Fundamentales	Inglés	
L F T	pie ft libra lb s	m kgf s
Derivada m $\left[\, m \,\right] = F\, L^{-1}\, T^2$	slug $1 \text{ slug} = 1 \text{ lb ft}^{-1} \text{ s}^2$	unidad técnica de masa $1 \text{ u.t.m.} = 1 \text{ kgf m}^{-1} \text{ s}^2$

Al kilogramo-fuerza, kgf, se le llama a veces kilopondio.

La relación entre la libra masa, lbm, y la libra, lb, unidad de fuerza, es análoga a la relación entre el kilogramo, kg y el kilogramo fuerza, kgf: una libra es el peso de un cuerpo cuya masa es una libra-masa.

Las equivalencias básicas con el sistema inglés son:

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ lbm} = 0.4536 \text{ kg}.$$

Con un manejo claro y ordenado de las relaciones básicas entre las diversas unidades, las conversiones de unas a otras se hacen con facilidad.

Veamos un ejemplo:

1 slug, ¿a cuántos kg equivale?

$$1 \text{ slug} = \frac{1 \text{ lb s}^2}{\text{ft}} = \frac{(1 \text{ lbm} \times g)\ \text{s}^2}{\text{ft}}$$

$$= \frac{1 \text{ lbm}}{\text{ft}} \times \left(\frac{9.80665 \text{ m}}{\text{s}^2}\right) \times \text{s}^2 \times \left(\frac{0.4536 \text{ kg}}{1 \text{ lbm}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ ft}}{0.3048 \text{ m}}\right)$$

$$1 \text{ slug} = 14.59 \text{ kg}.$$