

ESTÁTICA

I. FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA CLÁSICA

ANTECEDENTES

La Mecánica es una parte de la Física que estudia el movimiento de los cuerpos. La Mecánica llamada clásica, en contraposición a las que han aparecido recientemente, como la cuántica o la relativista, tiene por principios la ley del paralelogramo y las leyes de Newton, que se originaron en el siglo XVII.

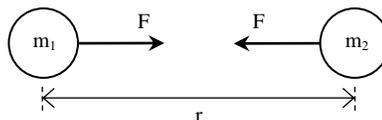
Bosquejo histórico

En la antigüedad, la Mecánica (μεκωνγγε = máquina) formaba parte de la Filosofía. Se ocupaba del estudio del movimiento de los cuerpos, pero atendiendo a sus causas remotas. Los griegos estudiaron los movi-

mientos de los cuerpos celestes, las máquinas simples, los momentos de las fuerzas y poco más. En la baja edad media aparecieron algunas teorías acerca de los movimientos de los astros y del ímpetu. Una figura central es la de Galileo Galilei que descubre la inercia de los cuerpos. Christian Huygens estudia el movimiento curvilíneo de la partícula y, en especial, la componente normal de la aceleración. El ingeniero holandés Simon Stevin establece el principio que lleva su nombre, también llamado ley del paralelogramo. Pero es Sir Isaac Newton (1642-1727) quien revoluciona no solamente la Mecánica, sino la actividad científica toda con su descubrimiento de la ley de la gravitación universal y su formulación de las tres leyes o axiomas del movimiento. Son notables las ecuaciones propuestas por Lagrange para la resolución de problemas analíticos. Los nombres de Varignon, Hooke, D'Alembert, Euler y Steiner tienen también una gran importancia en el desarrollo de la Mecánica clásica.

La ley de la gravitación universal, es decir, *la ley de la pesadez de todos los cuerpos*, se puede establecer de la siguiente manera: “todos los cuerpos se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa” Simbólicamente suele representarse así:

$$F = Gm_1 \cdot m_2 / r^2$$



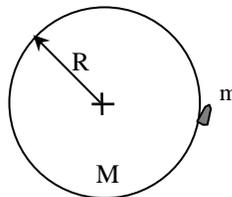
en donde F es la fuerza de atracción, fuerza de gravedad o peso; G , la constante de gravitación universal, cuyo valor, en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es $G=6.673(10^{-11}) \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$, y m_1 y m_2 las masas de los cuerpos en cuestión.

La fuerza de gravedad entre dos muebles, dos automóviles, etc. Es pequeñísima y suele despreciarse. En cambio, la fuerza que la Tierra ejerce sobre los cuerpos que se hallan en su superficie sí es considerable y es la fuerza que recibe en nombre de “peso” por antonomasia. El peso de un automóvil pequeño, por ejemplo, es del orden de una tonelada. Dado que esta fuerza depende de la constante G , de la masa de la Tierra y del radio de ésta, es más práctico expresar el peso de un cuerpo de masa m en la forma

$$P = mg$$

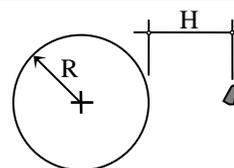
en donde g es el producto de la constante de gravitación universal por la masa de la tierra dividido entre el cuadrado del radio terrestre:

$$g = \frac{GM}{R^2}$$



y corresponde al valor de la aceleración típica de la gravedad; ordinariamente se considera de 9.81 m/s^2 , que equivale a 32.2 ft/s^2 .

Ejemplo. Se desea saber a qué altura H sobre la superficie de la Tierra se debe colocar un cuerpo para que su peso se reduzca a la mitad.



Como la ley de la gravitación universal establece que la fuerza de atracción entre dos cuerpos, es decir, el peso, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, podemos escribir la siguiente igualdad:

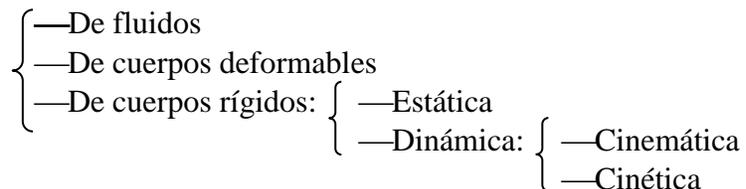
$$\frac{2}{1} = \frac{(R + H)^2}{R^2}$$

en donde \bar{R} es el radio de la Tierra y \bar{H} la altura buscada. $\bar{R} + \bar{H}$ es la distancia al centro de la Tierra que produce que el peso sea la mitad del que tiene a una distancia R . Obteniendo la raíz cuadrada de ambos miembros y dando a R un valor de 6370 km , tenemos

$$\begin{aligned} \sqrt{2} &= \frac{R + H}{R} \\ R\sqrt{2} &= R + H \\ H &= R(\sqrt{2} - 1) \\ H &= 6370(\sqrt{2} - 1) \\ \boxed{H &= 2640 \text{ km}^{(1)}} \end{aligned}$$

⁽¹⁾ Este resultado esta redondeado a la tercera cifra significativa, según advertimos en el prefacio.

División de la Mecánica clásica



Estática: estudia el equilibrio de los sistemas de fuerzas.

Dinámica: se ocupa propiamente del movimiento de los cuerpos. Si sólo estudia el movimiento, sin atender a sus causas, se trata de la *Cinemática*. Y la *Cinética* relaciona el movimiento con las causas que lo producen.

Conceptos básicos ⁽²⁾

—*Cuerpo*: porción limitada de materia.

—*Materia*: lo que ocupa un lugar en el espacio.

—*Masa*: es la cantidad de materia que contiene un cuerpo.

—*Movimiento*: cambio de posición de un cuerpo ⁽³⁾.

—*Posición*: lugar.

—*Cuerpo rígido*: es el cuerpo cuyas partículas mantienen fija su distancia entre ellas. Este concepto es una idealización muy útil en el estudio de la Mecánica clásica.

⁽²⁾ Los conceptos de espacio y tiempo se han omitido porque sus definiciones han sido objeto de un sinnúmero de discusiones y teorías que exceden las pretensiones de este curso. Además, consideramos que se trata de conceptos intuitivos y que el estudiante no requiere de ellos ninguna definición. San Agustín dice “¿Qué es entonces el tiempo? Si nadie me lo pregunta, lo sé. Si quiero explicárselo a quien me pregunta, no lo sé.” (*Confesiones* XI, XIV). Los escolásticos definen el tiempo como *numerus motus secundum prius et posterius* (la medida del movimiento según un antes y un después).

⁽³⁾ Nos referimos exclusivamente al movimiento local de los cuerpos. Movimiento, en general, es el acto del ser en potencia en tanto que está en potencia.

—*Partícula*: es un punto dotado de materia; o bien, un cuerpo que carece de dimensiones. Igual que el concepto anterior, se trata de una idealización. La Mecánica newtoniana considera que los cuerpos están constituidos por infinidad de partículas unidas una con otras, sin espacios entre sí. Se trata también de un concepto idealizado.

—*Fuerza*: la acción de un cuerpo sobre otro capaz de alterar su movimiento.

—*Equilibrio*: es el estado de un cuerpo en el que unas fuerzas compensan a otras.

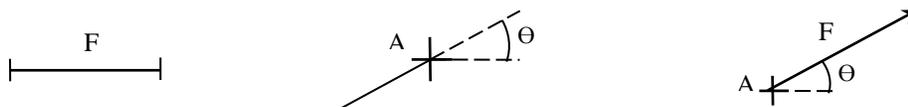
Fuerzas

Dijimos arriba que es la acción de un cuerpo sobre otro, pero no cualquier acción, sino la que puede producir, suprimir o cambiar el movimiento de los cuerpos involucrados. Se trata justamente de la causa de dicho movimiento y, por tanto, su comprensión es central en los estudios de Mecánica.

Las fuerzas son realidades físicas muy comunes. Todos los cuerpos que conocemos están sujetos a fuerzas. Los objetos que nos rodean sufren generalmente las acciones de otros objetos. Por ejemplo, la silla en que estamos sentados está sujeta a la acción de la Tierra, o sea, su propio peso, la fuerza que nuestro cuerpo ejerce sobre ella, y las que el suelo produce sobre cada una de las patas. Otro ejemplo: si deseamos abrir la puerta, debemos dar vuelta a la perilla, que es ejercer una fuerza, y jalar la puerta: segunda fuerza.

Las características de una fuerza son:

1. *Magnitud*: es el tamaño o intensidad de la fuerza. A veces se denomina módulo
2. *Línea de acción*: o soporte, es la recta sobre la que actúa la fuerza.
3. *Sentido*: define hacia qué lado de la línea de acción actúa la fuerza.

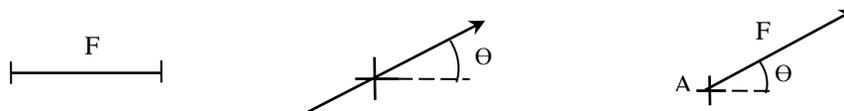


Fundamentos de la Mecánica clásica

Pensemos en algún objeto que tengamos presente, por ejemplo el escritorio en el que trabajamos. Su peso, digamos de 40 kg, es una fuerza que la Tierra ejerce sobre él y que conoceremos completamente, pues su magnitud es de 40 kg (si en efecto eso pesa); su línea de acción es una recta vertical que pasa por el centro de gravedad del escritorio; y su sentido es hacia abajo.

Pero también se puede hablar de las siguientes tres características:

1. *Magnitud*: o tamaño
2. *Dirección*: es el ángulo que su línea de acción forma con respecto a una recta conocida, generalmente la horizontal. (La dirección lleva incluido el sentido.)
3. *Posición*: un punto de su línea de acción.



Tomando nuevamente el ejemplo del peso del escritorio: su magnitud es de 40 kg, su dirección es de 90° a partir de la horizontal en el sentido de las manecillas del reloj (o simplemente vertical hacia abajo), y su posición es el centro de gravedad del escritorio.

Los efectos de las fuerzas pueden ser

- Externos*: los movimientos de los cuerpos.
- Internos*: los esfuerzos y las deformaciones.

La Mecánica de los cuerpos rígidos, que estamos estudiando, sólo considera los efectos externos.

Clasificación de las fuerzas

Según su modo de actuar, las fuerzas pueden ser:

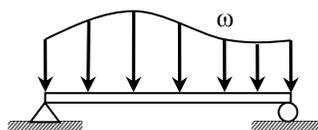
- Por contacto*. Se da cuando los cuerpos se tocan.

—A distancia. Las fuerzas de gravedad y las electromagnéticas son de este tipo. Para efectos prácticos, las únicas fuerzas de gravedad que se tienen en cuenta son los pesos de los cuerpos.

Conforme a su aplicación, las fuerzas se pueden dividir en:

—*Distribuidas*: son las que se aplican en una superficie. Suelen representarse mediante un área sobre el cuerpo en estudio.

—*Concentradas*: se consideran aplicadas en un solo punto. Se trata generalmente de fuerzas reales que actúan sobre superficies muy pequeñas, despreciables en comparación con otras dimensiones del problema; o de fuerzas teóricas, como las resultantes de los sistemas de fuerzas. Se representan mediante un segmento dirigido de recta.



Clasificación de los sistemas de fuerzas

La siguiente clasificación será la que emplearemos en nuestro estudio, atendiendo a las líneas de acción de las fuerzas. Las fuerzas en el plano son las que se estudiarán en dos dimensiones; las del espacio, en tres.

- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| A. FUERZAS EN EL PLANO | 1. Colineales |
| | 2. Concurrentes |
| | 3. Paralelas |
| | 4. No concurrentes ni paralelas |
| B. FUERZAS EN EL ESPACIO | 1. Concurrentes |
| | 2. Paralelas |
| | 3. Sistema general de fuerzas |

Los sistemas colineales y concurrentes los agruparemos en el capítulo de resultantes de fuerzas que actúan sobre la partícula. Mientras que los sistemas de fuerzas paralelas y de fuerzas no concurrentes ni paralelas quedarán en el capítulo de resultantes de fuerzas que actúan sobre el cuerpo rígido.

Composición de fuerzas

Una parte importante del curso de Estática trata del proceso de composición de fuerzas. Para entenderlo, es necesario conocer los siguientes conceptos.

—*Sistemas equivalentes de fuerzas*: son aquellos que producen los mismos efectos externos.

—*Resultante*: es el sistema equivalente más simple.

—*Composición de fuerzas*: es el proceso teórico por el que se transforma un sistema de fuerzas en otro más simple. También se suele llamar *reducción de fuerzas*. La obtención de la resultante es una composición de fuerzas.

—*Resolución de fuerzas*: consiste en transformar un sistema de fuerzas en otro más complejo. También se llama *descomposición*.

La resultante, o sistema resultante de un sistema de fuerzas, como es el equivalente más simple, tiene que ser irreductible. Como se demostrará en el curso, deberá ser una fuerza o un par de fuerzas, si se trata de fuerzas en el plano, o una fuerza, un par de fuerzas, o una fuerza y un par, en el caso de las fuerzas en el espacio. Un sistema de fuerzas está en equilibrio si no produce ningún efecto externo al actuar sobre un cuerpo. Como es evidente, la resultante de un sistema de fuerzas en equilibrio es nula.

Par de fuerzas es un sistema formado por dos fuerzas paralelas, de la misma magnitud, pero de sentido contrario. Como se deduce de lo que dijimos en el párrafo anterior, es irreductible.

Se llama *equilibrante* a un sistema igual al resultante, pero de sentido contrario, puesto que bastaría aplicarlo a un sistema para convertirlo en un sistema de fuerzas en equilibrio.

PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA CLÁSICA

Por principio de una ciencia se entiende aquel fundamento o base a partir del cual se deducen los conocimientos. Estos principios pueden ser axiomas, hipótesis, leyes, etc. Como ningún contenido de una disciplina es anterior a los principios, éstos son indemostrables: se aceptan como verdaderos. Si el desarrollo de la ciencia muestra que los resultados que se obtienen coinciden con la realidad, quedará confirmada la veracidad de los principios.

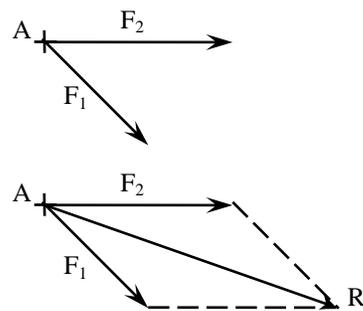
La Mecánica clásica se funda en cuatro principios: la ley del paralelogramo y las tres leyes de Newton.

1. Ley del paralelogramo

La ley del paralelogramo, que también se conoce como **principio de Stevin** por haber sido formulado por el ingeniero militar flamenco Simon Stevin (1548-1620), establece lo siguiente:

La resultante de dos fuerzas que concurren en un punto se encuentra en la diagonal del paralelogramo construido con dichas fuerzas, y pasa por dicho punto.

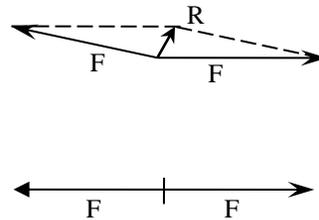
Es decir, si se desea conocer la resultante de las fuerzas F_1 y F_2 que concurren en el punto A , se representan a escala y se dibuja un paralelogramo cuyos lados son esas dos fuerzas. En la diagonal que contiene al punto A queda determinada la magnitud (a la misma escala empleada) y la dirección de la fuerza resultante buscada.



Corolario

Dos fuerzas colineales, de la misma magnitud y de sentido contrario están en equilibrio.

Si el ángulo que forman dos fuerzas cuya línea de acción pase por el punto A crece hasta aproximarse a los 180° , la diagonal del paralelogramo va reduciendo su longitud. Cuando las dos fuerzas estén contenidas en la misma línea, la resultante será nula, es decir, el sistema estará en equilibrio.



2. Primera ley de Newton

La primera ley de Newton, también conocida como *ley de la inercia*, fue redactada como sigue: *Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare*. Y se puede traducir así: “Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, a menos de que sea obligado por fuerzas impresas (externas, diríamos hoy) a cambiar ese estado”.

A la luz de esta ley, podemos afirmar que una partícula está en estado (i. e., en una situación estable) de equilibrio cuando se encuentra en reposo o se mueve en línea recta con velocidad constante ⁽⁴⁾. También, que es necesaria la acción de otro cuerpo para producir una alteración del movi-

⁽⁴⁾ Nadie ignora que los cuerpos que nos rodean y que decimos que están quietos, no están realmente en reposo, pues se mueven junto con la Tierra. Por la misma razón, un cuerpo sobre la Tierra difícilmente puede moverse en línea recta. No obstante, la aceleración que sufren los cuerpos en tales condiciones podemos conocerla y es prácticamente imperceptible, de modo que sabemos que no se comete un error significativo si consideramos que están en reposo o dotados de movimiento rectilíneo uniforme. Por otro lado, ¿quién puede señalar algún punto del universo que se halle en reposo?

miento; o sea, que un cuerpo es incapaz por sí mismo de lograrlo: de ahí su nombre de ley de la inercia (del latín *inertia*, α = incapacidad).

En Mecánica se entiende por inercia la oposición de un cuerpo a cambiar su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme. Es proporcional a la masa del cuerpo.

3. Segunda ley de Newton

La versión original de la segunda ley de Newton es la siguiente: *Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressæ, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur*. Y su traducción es “El cambio del movimiento es proporcional a la fuerza motriz externa, y ocurre según la línea recta en la cual se imprime esa fuerza”.

Al hablar de cambio del movimiento Newton entendía cambio de la *cantidad de movimiento*. Dicha cantidad es el producto de la masa de un cuerpo por su velocidad: mv . Como la velocidad es una cantidad caracterizada por su magnitud y su dirección, también lo es la cantidad de movimiento: son cantidades vectoriales (que escribiremos con negritas).

Esta ley se puede expresar matemáticamente así.

$$\mathbf{F} = k d(m\mathbf{v})/dt$$

Puesto que la masa no es función del tiempo, se puede escribir

$$\mathbf{F} = k m d\mathbf{v}/dt$$

Y dado que si se deriva la velocidad con respecto al tiempo se obtiene su aceleración, la expresión anterior se convierte en

$$\mathbf{F} = k m \mathbf{a}$$

Si se elige un sistema de unidades consistente, en el cual la unidad de fuerza produzca la unidad de aceleración a la unidad de masa, se logra que la constante de proporcionalidad k sea igual a uno, y se llega a una expresión muy práctica:

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

Las aplicaciones de esta ley se estudiarán en el curso de Dinámica.

Corolario

No se alteran los efectos externos si a un sistema de fuerzas se le añade o se le suprime otro sistema en equilibrio.

4. Tercera ley de Newton ⁽⁵⁾

La última de las leyes de Newton, que él llama axiomas del movimiento, recibe el nombre de *ley de la acción y la reacción* y establece una sola proposición de dos maneras diferentes: *Actioni contrariam semper et æqualem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse æquales et in partes contrarias dirigi*. “Para toda acción hay siempre una reacción igual y contraria: o bien, las acciones mutuas de dos cuerpos son siempre iguales y de sentido contrario”.

Tres ejemplos servirán para ilustrar el contenido de esta ley.

—Acción: un florero ejerce sobre el mueble en que se halla una fuerza de magnitud F dirigida hacia abajo; reacción: el mueble ejerce una fuerza de magnitud F dirigida hacia arriba.

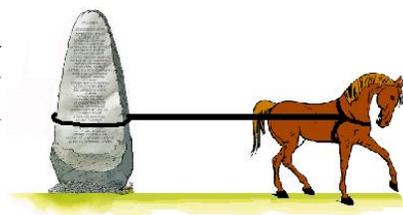
—Acción: un estibador empuja una caja con una fuerza de intensidad Q hacia el norte; reacción: la caja empuja al estibador hacia el sur con una fuerza de intensidad Q .

—Acción: la rueda trasera de una bicicleta empuja el pavimento hacia atrás con una fuerza de tamaño P ; reacción: el pavimento empuja la rueda de la bicicleta con una fuerza de tamaño P hacia adelante.

Aunque con estas cuatro leyes quedan completos los principios de la Mecánica newtoniana, demostraremos a continuación un teorema muy útil para el estudio de la Estática.

Teorema de la transmisibilidad de las fuerzas

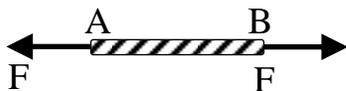
Demostraremos el teorema de la transmisibilidad de las fuerzas apoyándonos en un ejemplo. Pensemos en un caballo que jala un menhir:



⁽⁵⁾ Conviene tener en cuenta que Newton, al formular sus leyes, piensa en lo que nosotros entendemos por “partícula”, pues prescinde de las dimensiones de los cuerpos, aunque se trate de unos tan grandes como son los planetas.

Fundamentos de la Mecánica clásica

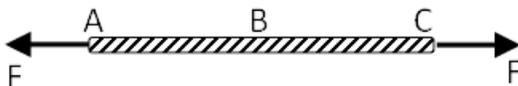
El caballo y la piedra jalan la cuerda por los extremos, que llamaremos A y B.



Pero supongamos que la cuerda tiene el doble de longitud, de modo que ahora es la cuerda ABC. Vamos a aplicar en C dos fuerzas iguales, colineales de dirección contraria, de modo que, como es un sistema de fuerzas en equilibrio, no se alteraren los efectos externos que sufre la cuerda.



Observemos que las dos fuerzas del centro son de igual magnitud y dirección contraria, por tanto, están en equilibrio y pueden retirarse de la cuerda sin que se alteren los efectos externos.



Al final, tenemos entonces que la fuerza se ha deslizado sobre su línea de acción y todos los efectos externos permanecen invariable. En esto consiste la transmisibilidad de las fuerzas, que podemos enunciar así:

Las fuerzas pueden deslizarse sobre su línea de acción sin que se alteren los efectos externos que producen.

Este teorema nos permite deducir que basta conocer un punto cualquiera de la línea de acción de una fuerza para que se determine, o bien su posición, o bien su línea de acción.

Serie de ejercicios de Estática

FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA CLÁSICA

1. Diga cuál es el objeto del estudio de la Mecánica clásica y a qué ciencia pertenece.

2. Además de la clásica o newtoniana, ¿qué otras ramas de la Mecánica se cultivan actualmente?

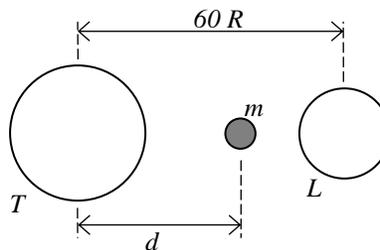
3. Enuncie la ley de la gravitación universal y escriba su expresión matemática.

4. ¿Qué es el peso de un cuerpo? ¿Cómo se designa su posición?

5. Si un cuerpo que pesa 100 kilogramos sobre la superficie de la tierra se eleva 2000 kilómetros, ¿cuánto pesará? Considere que el radio de la tierra mide 6370 kilómetros.

(Sol. 57.9 kg)

6. Sabiendo que la luna dista de la Tierra una longitud de sesenta radios terrestres ($R = 6370$ km), calcule a qué distancia d del centro de nuestro planeta debe colocarse un cuerpo de masa m para que las fuerzas de atracción que la tierra y la luna ejerzan sobre él sean iguales. La masa de la tierra es seis veces mayor que la de la luna.



(Sol. 271 000 km)

7. Enumere las divisiones de la Mecánica clásica, según el tipo de cuerpos que estudia.

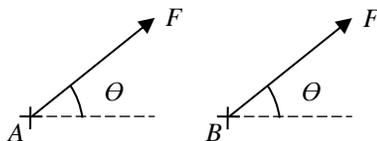
8. ¿Cómo se subdivide el estudio de los cuerpos rígidos?

9. Diga qué estudia la Estática.

10. Defina los siguientes conceptos: *a)* cuerpo; *b)* materia; *c)* masa; *d)* movimiento; *e)* posición; *f)* cuerpo rígido; *g)* partícula; *h)* fuerza; *i)* equilibrio.

11. ¿Cuáles son las tres características de una fuerza?

12. Dos fuerzas tienen la misma magnitud y la misma dirección. Para que sean iguales, ¿qué otra característica deben tener en común?



13. Dos fuerzas tienen la misma magnitud y la misma línea de acción. Para que sean iguales, ¿qué otra característica deben tener en común?



14. Explique la diferencia entre una fuerza concentrada y una fuerza distribuida.

15. ¿Qué son sistemas de fuerzas equivalentes?

16. Defina el concepto de *resultante* de un sistema de fuerzas.

17. El sistema *resultante* de un sistema de fuerzas, ¿puede estar constituido por: *a)* cuatro fuerzas? *b)* dos fuerzas cualesquiera? *c)* una fuerza? *d)* un *par de fuerzas*? *e)* una fuerza y un *par de fuerzas*?

18. ¿Qué significa que un sistema de fuerzas esté en equilibrio?

19. Si el sistema *resultante* de un sistema de fuerzas es nulo, ¿está en equilibrio el sistema?

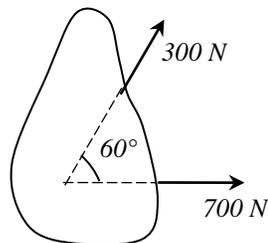
20. Diga en qué consiste *componer* un sistema de fuerzas.

Fundamentos de la Mecánica clásica

21. ¿Qué se entiende por *resolución* de un sistema de fuerzas? ¿Qué otro nombre recibe este proceso?
22. ¿Qué se entiende por *par de fuerzas*, o *par* simplemente?
23. ¿Qué se entiende por *principio* de una ciencia?
24. Enumere los principios de la Mecánica clásica.
25. El principio de Stevin o ley del paralelogramo, ¿qué enunciado tiene?

26. Determine la magnitud y la dirección de la fuerza resultante de las dos que actúan sobre al menhir de la figura, dibujando a escala un paralelogramo con dichas fuerzas.

(Sol. 890 N \nearrow 17°)



27. El enunciado de la primera ley de Newton, tal como aparece en los *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, es el siguiente:

LEX I. Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare.

Esta ley, que recibe el nombre de ley de la inercia, se puede traducir así: Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, hasta que sea obligado por fuerzas impresas a cambiar ese estado.

- a) ¿En qué estados se puede encontrar una partícula para estar en equilibrio?
- b) ¿Qué se entiende por movimiento rectilíneo uniforme?
- c) ¿Qué significa la palabra *inercia*?
- d) En la Mecánica clásica, ¿qué se entiende por inercia?; ¿de qué depende la inercia de un cuerpo?

28. El enunciado de la segunda ley de Newton es el siguiente:

LEX II. *Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressæ, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.*

Cuya traducción es como sigue: El cambio del movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa, y ocurre según la línea recta en la cual se imprime esa fuerza.

a) En esta ley, ¿qué se entiende por *movimiento* o, mejor, *cantidad de movimiento*?

b) Modernamente, el cambio de la cantidad de movimiento se sustituye por el producto de la masa por la razón de cambio de la velocidad al tiempo. ¿Qué nombre recibe esta razón?

c) ¿Qué nombre reciben ahora tanto las fuerzas *impresas* como las *motrices impresas*?

d) ¿Con qué palabra se designa a la línea recta en que ocurre el cambio del movimiento?

e) Generalmente la segunda ley de Newton se expresa matemáticamente así: $\mathbf{F} = k\mathbf{ma}$, donde tanto \mathbf{F} como \mathbf{a} son vectores. ¿De qué manera se logra que la constante de proporcionalidad k sea igual a 1?

29. ¿Cuáles son los dos corolarios de la ley del paralelogramo y de la segunda ley de Newton que resultan útiles a nuestro propósito de estudiar el equilibrio de los sistemas de fuerzas y de transformar dichos sistemas?

30. La tercera ley de Newton se enuncia de la siguiente forma:

LEX III. *Actioni contrariam semper et æqualem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse æquales et in partes contrarias dirigi.*

Y su traducción es: Para toda acción hay siempre una reacción igual y contraria: o bien, las acciones mutuas de dos cuerpos son siempre iguales y se dirigen hacia partes contrarias.

a) En el enunciado de esta tercera ley se habla dos veces de igualdad. ¿Qué características de las fuerzas o acciones deben ser iguales?

Fundamentos de la Mecánica clásica

b) ¿A qué característica de las fuerzas se refiere el hecho de que la acción y la reacción se dirijan hacia partes contrarias?

c) ¿Qué tipo de ser, ente o cosa puede ejercer una fuerza o acción?
¿Qué cosa o criatura es capaz de sufrir una fuerza o reacción?

31. Demuestre la segunda ley de Newton.

32. Enuncie el teorema de la transmisibilidad de las fuerzas.

33. ¿Qué significa determinar la posición de una fuerza?