

por consiguiente esta relación misma, eran visibles á los ojos de todos los presentes (1).

Hoy se reproduce el experimento de León Foucault haciendo uso de péndulos de dimensión mucho menor. Una condición esencialísima de esta reducción de longitud consiste en el modo de suspensión, la cual debe permitir al péndulo oscilar libremente en todos los azimuts, requisito que llena enteramente la suspensión *á la Cardán*. Verifícase de un modo muy ingenioso la anotación gráfica de las desviaciones; la bola del péndulo lleva en su parte inferior un punzón fino y flexible cuya punta rasa con la superficie de una cinta de papel ennegrecida con negro de humo, pegada á la superficie de un arco de círculo, cuyo radio es precisamente la longitud comprendida entre el punto de suspensión y la extremidad del punzón flexible. La dirección del plano del péndulo resulta marcada, á cada una de sus oscilaciones, con una rayita blanca, y así se conserva la huella de las desviaciones continuas y sucesivas de dicho plano.

CAPÍTULO II

MEDICIÓN DEL PESO DE LOS CUERPOS.—LA BALANZA

“De la precisión de las pesas y medidas depende el perfeccionamiento de la química, de la física y de la fisiología. Las pesas y medidas son jueces inflexibles que predominan sobre todas las opiniones basadas únicamente en observaciones imperfectas.”

(J. MOLESCHOT: *La circulación de la vida.—Indestructibilidad de la materia.*)

I

CENTROS DE GRAVEDAD.—EQUILIBRIO DE LOS CUERPOS PESADOS

Hemos visto en la primera parte de este tomo que la gravedad obra del mismo modo en todos los cuerpos, cualesquiera que sean la forma, tamaño y naturaleza de su substancia. Podemos, pues, considerar todo cuerpo pesado como la agregación de una multitud de moléculas, cada una de las cuales está sometida individualmente al influjo de la gravedad. Todas estas fuerzas iguales actúan paralelamente, de suerte que producen el mismo efecto que una fuerza única y de intensidad igual á la suma de todas ellas. Esta resultante de todas las acciones de la gravedad compone el *peso* del cuerpo. El punto á que dicha resultante se aplica, y que lleva el nombre de *centro de gravedad del cuerpo*, es el que se necesita sostener para que éste no pierda el equilibrio, sea cualquiera la posición que ocupe. Dicho punto no está siempre situado en el interior del cuerpo mismo, sino que en ciertos casos se halla fuera, en un sitio independiente de la masa material.

Puede ser interesante y á menudo muy útil conocer la posición del centro de gra-

(1) León Foucault ha hecho evidente de otro modo el principio de rotación de la Tierra, basándose en un principio análogo de mecánica. El aparato á que aludimos ha recibido el nombre de *giroscopio*. El lector encontrará su descripción y teoría en los tratados de mecánica más recientes. (*N. del A.*)—También está descrito dicho aparato en la obra *El Telescopio moderno*, publicada por nuestra casa editorial. (*N. de los E.*)

vedad de un cuerpo. En el caso en que la materia de que éste está compuesto sea homogénea en todas partes y su forma simétrica ó regular, la averiguación del centro de gravedad es puramente asunto de geometría. Veamos cuáles son las más comunes de estas formas.

Una *línea recta* pesada tiene su centro de gravedad en medio de su longitud. En realidad, la línea material es prismática ó cilíndrica; pero en el caso en que el espesor

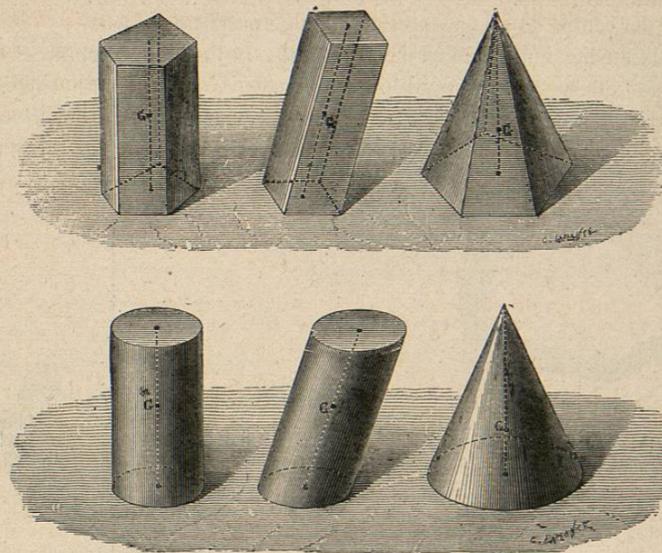


Fig. 146.—Centros de gravedad de un prisma, un cilindro, una pirámide y un cono

sea muy pequeño, relativamente á la longitud, se puede prescindir de él sin inconveniente. La misma observación podemos hacer con respecto á las superficies muy delgadas, á las que se considera como figuras planas ó curvas sin espesor ó grueso.

El *cuadrado*, el *rectángulo*, el *paralelógramo*, tienen sus centros de gravedad en el punto de intersección de sus diagonales. El *triángulo* lo tiene en el punto de encuentro de las líneas que van á parar desde cada vértice á la mitad del lado opuesto, es decir, en el tercio de cualquiera de estas líneas á partir de la base. Si estas superficies estuvieran reducidas á sus contornos exteriores, la posición de los centros de gravedad

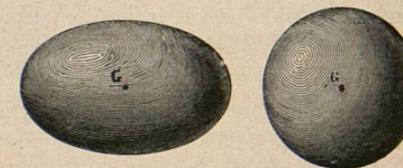


Fig. 147.—Centros de gravedad de un elipsoide de revolución y de una esfera

no cambiaría. El centro de figura de un *círculo* ó de un *anillo circular* ó de una *elipse* es al mismo tiempo su centro de gravedad. En el anillo circular tenemos un ejemplo del centro de gravedad situado fuera del espacio ocupado por la materia del cuerpo.

Los cilindros *rectos* ú *oblicuos*, los *prismas regulares*, los *paralelepípedos*, tienen sus centros de gravedad en la mitad de su eje (fig. 146). El de la *esfera* ó del *elipsoide* de revolución está en su centro de figura (fig. 147). Lo propio podemos decir de una *esfera hueca*, es decir, del centro de gravedad de un sólido comprendido entre dos

esferas concéntricas. Para tener el de una *pirámide* ó un *cono*, recto ú oblicuo, es preciso reunir el vértice al centro de gravedad del polígono de base, y tomar la cuarta parte de esta línea á partir de la base.

Esto por lo que respecta á los cuerpos de forma geométrica homogéneos y sea cualquiera el estado físico de la materia de que están formados (1).

Pero lo más frecuente es que el cuerpo tenga una forma irregular, ó que la materia de que se compone no esté condensada por igual en todas sus partes. En este caso, la averiguación del centro de gravedad es cuestión de práctica.

Uno de los medios más sencillos de encontrarlo consiste en suspender el cuerpo de un hilo. Cuando éste se halla en equilibrio, se ve que el centro de gravedad está en la prolongación del hilo cuya posición es entonces vertical: se anota esta dirección, y se hace otra averiguación suspendiendo el cuerpo por otro de sus puntos, con lo que se

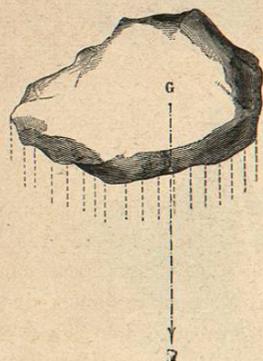


Fig. 148.—Peso de un cuerpo: centro de gravedad

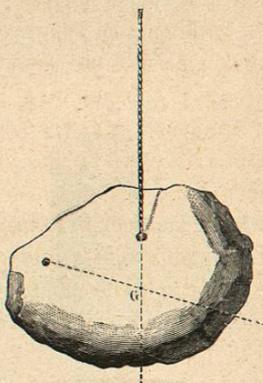


Fig. 149.—Determinación del centro de gravedad de un cuerpo de forma irregular ó no homogénea

tiene una nueva línea en la cual se halla el centro de gravedad. El punto de intersección de ambas líneas señala, pues, el del verdadero centro (fig. 149), que puede estar en el interior ó en el exterior del grave.

La definición del centro de gravedad demuestra que cuando este punto está solamente sostenido ó bien se halla fijo, mientras esté invariablemente unido á todos los puntos materiales de que el cuerpo se compone, hay equilibrio. Pero semejante condición es muy difícil de llenar, por cuanto lo más frecuente es que el centro de gravedad se halle en un punto interior, por el cual no se puede sostener ó suspender el cuerpo inmediatamente.

(1) Cuando los cuerpos están formados de diferentes partes geométricas reunidas de cualquier modo y teniendo cada una de ellas un centro de gravedad conocido, es fácil encontrar el de su conjunto si se conoce el peso de las partes. Tomemos un sencillo ejemplo, el del instrumento de gimnasia que se llama *halterio*. Como cada una de sus bolas es esférica, el centro de gravedad está en su centro y el del conjunto en medio de la línea que reúne los dos centros. Esta parte media es también el centro de gravedad de la barra cilíndrica que los reúne, y por consiguiente el de todo el instrumento. Pero si una de las esferas es mayor y más pesada que la otra, el centro de gravedad estará en el punto que divide la línea de los centros en partes inversamente proporcionales á los pesos de ambas esferas. El centro de gravedad de la barra cilíndrica sigue estando en su mitad. Si esta barra pesa 500 gramos, y las dos bolas, una 1 kilogramo y la otra 4, ó sea 5 kilogramos en junto, habrá que dividir la distancia desde el punto medio de la barra hasta el centro de gravedad y de las esferas en relación inversa de las cantidades 500 y 5.000 ó sea 1 y 10, y el resultado de esta operación indicará el centro de gravedad de todo el sistema.

Si se le suspende de un hilo ó de una cuerda flexible, el equilibrio se establecerá por sí mismo, pues el centro de gravedad irá á situarse entonces en la vertical que pasa por el punto de suspensión. Si después de obtenida esta posición se empuja al cuerpo, formará un péndulo compuesto, ejecutará cierto número de oscilaciones alrededor de su posición y volverá luego á su estado de reposo. Esto es lo que se llama un *equilibrio estable*, equilibrio cuya condición esencial consiste en que la posición del centro de gravedad sea inferior al punto fijo de suspensión, de suerte que, si se hace mover el cuerpo, dicho centro sube.

En general, para que un cuerpo pesado esté en equilibrio bajo la acción de la gravedad, se requiere y basta que su centro de gravedad se halle en una vertical que pase por el punto de apoyo, si este punto es único, ó por el interior del plano de apoyo, ó mejor, del polígono convexo que se puede siempre formar reuniendo los puntos de apoyo por medio de líneas rectas, si los puntos fijos son más ó menos numerosos. En las figuras 150 y 151 tenemos muchos ejemplos de ello. Las torres inclinadas de Bolonia y Pisa (véase la pág. 43) son también ejemplos singulares de equilibrio, debidos á la circunstancia de que el

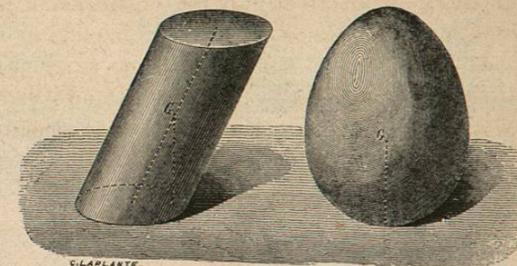


Fig. 150.—Equilibrio de un cuerpo que descansa sobre un plano por un solo punto ó por otro plano

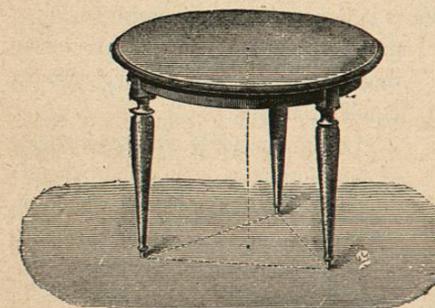


Fig. 151.—Equilibrio de un cuerpo que descansa por tres puntos sobre un plano

centro de gravedad del edificio se halla en una vertical que cae á un punto interior de la base. Pero se comprende que los materiales de que se componen esas torres están unidos entre sí de modo que cada uno de ellos no puede obedecer separadamente á la fuerza que ocasionaría su caída.

Ese aguador, ese mozo de cordel representados en la figura 152, toman posturas inclinadas ó hacia delante, y tales que el centro de gravedad del conjunto formado por su cuerpo y la carga que éste sostiene queda en una vertical formada por los pies del conductor. Lo propio sucede con ese carro que rueda por un camino inclinado transversalmente (fig. 153): conserva el equilibrio mientras su centro de gravedad subsiste verticalmente sobre la base comprendida entre los puntos en que las ruedas tocan el suelo. Volcará si sucede lo contrario, ya por ser demasiada la inclinación del camino, ó bien por los choques que reciba el vehículo y por las dislocaciones que estos choques producirán en el centro de gravedad, si la velocidad del carro es extremada.

Cuando el cuerpo está sostenido por un eje horizontal, alrededor del cual puede girar libremente, el equilibrio puede ser *estable*, *indiferente* ó *inestable*. Es estable, si el centro de gravedad está debajo del eje; indiferente, si se halla en el eje mismo; é

inestable, si encima de él. En la figura 154 tenemos un ejemplo de cada uno de estos casos.

Hay varios aparatos de física, ó si se quiere, juguetes, que sirven para poner en evidencia estas condiciones de equilibrio de los cuerpos, según la posición que ocupan sus centros de gravedad.

El *equilibrista* del grabado 155 es una figurita que se apoya por un punto en la



Fig. 152.—Posiciones de equilibrio de dos personas cargadas

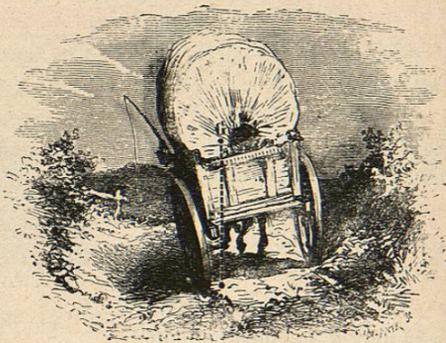


Fig. 153.—Equilibrio sobre un plano inclinado

base superior de un zócalo. A cada lado del personaje hay una varilla metálica que termina en una bola pesada, de plomo por ejemplo, varillas que son lo suficientemente largas para que el centro de gravedad de la figura esté más bajo que el plano de suspensión.

Si se hace oscilar en distintas direcciones la figura, ésta se enderezará siempre para recobrar su equilibrio, y en efecto todo el conjunto se halla en el caso del equilibrio estable.

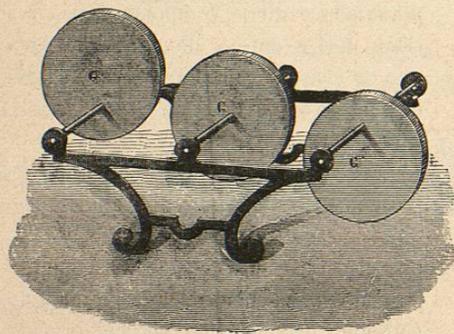


Fig. 154.—Equilibrio inestable, indiferente y estable

Lo propio sucede con esos juguetes de niño formados de un cilindro de médula de saúco á cuya base va unido un botón de plomo. Si se inclina el cilindro sobre un plano horizontal de modo que una de sus aristas esté tendida sobre el plano (fig. 156), el centro de gravedad no estará ya en la vertical que pasa por la arista de apoyo; pero vuelve á él bruscamente levantando el juguete, que se coloca de nuevo verticalmente.

Los *dominguillos* (fig. 157) son una forma más entretenida dada á dichos juguetes.

Por último, los relojes *mágicos* ó *misteriosos* están contruídos en virtud de la misma condición de equilibrio que hace que el centro de gravedad de un sistema capaz de girar alrededor de un eje fijo propenda siempre á situarse en el punto más bajo. He aquí en qué consisten dichos relojes y lo que justifica el calificativo que se les ha dado.

Se componen de un cuadrante circular ó rectangular, lo mismo da (fig. 158), suspendido de un plano vertical por dos hilos metálicos atados á dos puntos de su contorno. Dicho cuadrante es de cristal perfectamente transparente, y lleva en su centro dos agu-

jas que marcan con regularidad la hora y los minutos, marchando sin ningún mecanismo aparente. Si se da á las agujas, haciéndolas girar con la mano, distinta posición de la de la hora marcada, vuelven á colocarse en la hora justa después de oscilar un poco, y si la interrupción ha durado algún tiempo, se colocan por sí mismas de modo que señalan la hora que deberían señalar si no se las hubiera tocado.

Es muy fácil hacerse cargo de la disposición mecánica ideada para producir esta marcha al parecer maravillosa.

La aguja de los minutos remata en su extremo posterior en un apéndice á manera de caja de reloj. Este apéndice contiene efectivamente un mecanismo

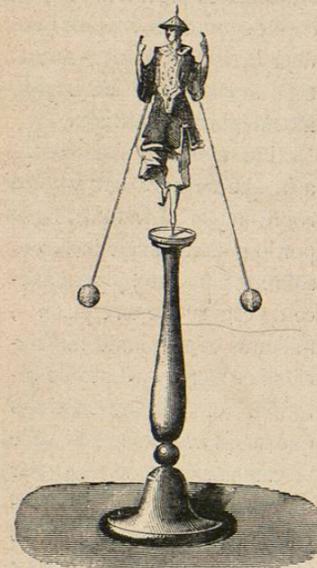


Fig. 155.—Equilibrista

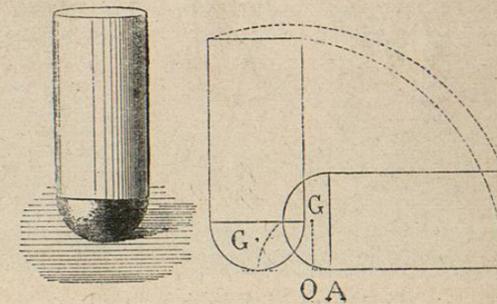


Fig. 156.—Movimiento del centro de gravedad (equilibrio estable)

de relojería que pone en marcha un peso adicional de platino y le hace describir una vuelta entera en una hora. El peso de platino va corriéndose por una ranura que rodea la circunferencia de la caja, y cambia á cada momento la posición del centro de gravedad de todo el sistema de la aguja.

Cuando dicho peso ó bola de platino avanza 15° por la circunferencia de la ranura, y luego otros 15° , etc., el centro de gravedad del conjunto pasa por puntos simétricamente situados en una circunferencia cuyo centro es precisamente el

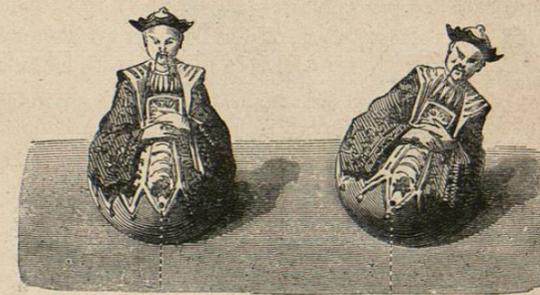


Fig. 157.—Dominguillos (equilibrio estable)

centro del cuadrante, es decir, aquel en que está fijo el eje del movimiento de la aguja.

El sistema de la aguja y del peso se halla en el caso citado del equilibrio estable. Su centro de gravedad, que propende de continuo á remontarse á la derecha, pasa también de continuo al punto más bajo, lo cual no puede tener efecto sin que la aguja gire alrededor de su eje, en sentido contrario, y en un ángulo precisamente igual al de la bola de platino. Esta bola invierte cinco minutos en describir 30° ; el minutero describe

el mismo ángulo en igual tiempo, es decir que su movimiento es precisamente el de un reloj bien arreglado.

Hemos visto anteriormente cuáles son las condiciones de equilibrio de un cuerpo que descansa en un plano, ó que se apoya por uno de sus puntos en un eje ó punto fijo: la vertical del centro de gravedad debe caer sobre el polígono de apoyo, ó bien pasar por el eje ó el punto que sostiene el cuerpo. Esta condición es precisa si se trata de un cuerpo en reposo, pero

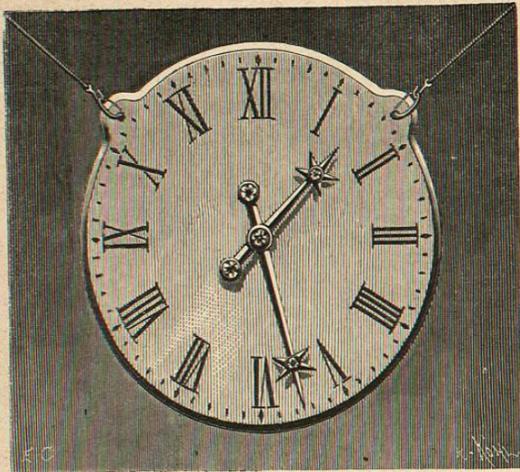


Fig. 158.—Reloj mágico de M. Robert

deja de serlo si este cuerpo está animado de un rápido movimiento de rotación.

Por ejemplo, una peonza a la que se hace dar vueltas sobre un plano horizontal tiene por lo general su eje inclinado sobre dicho plano, y permanece de esta suerte en equilibrio, mientras es suficiente la velocidad de su movimiento de rotación. Pero al mismo tiempo que su eje está inclinado, se le ve cambiar de lugar y describir un cono alrededor de la vertical (fig. 159), proporcionando así una representación gráfica

del lento fenómeno que hemos descrito con el nombre de precesión de los equinoccios.

He aquí otro ejemplo singular de equilibrio de los cuerpos en movimiento. Un disco metálico M (fig. 160) puesto sobre un eje OA descansa por su extremo O en una peana,

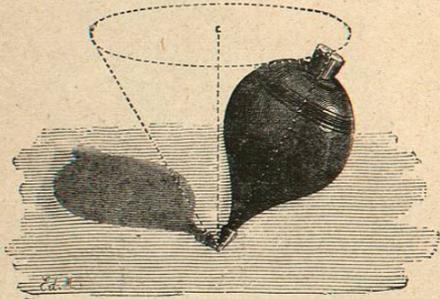


Fig. 159.—Movimiento de precesión y equilibrio del trompo

estando el otro extremo al alcance de la mano. Dase al disco así situado un rápido movimiento de rotación, y en seguida se le abandona á sí mismo, soltando el extremo A de su eje. Si en tal posición estuviese inmóvil la masa M, se la vería caer siguiendo la vertical de su centro de gravedad y girando alrededor del extremo O; pero gracias á la velocidad de rotación que la anima, conserva su posición; su eje continúa inclinado describiendo lentamente alrededor de la vertical una superficie cónica regular. Este ejemplo es análogo al de la peonza. La teoría hace comprensibles estos casos singulares de equilibrio, en los que entra por mucho la fuerza de inercia.

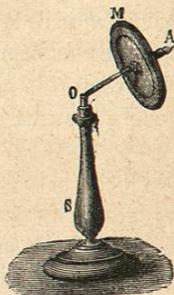


Fig. 160.—Movimiento giroscópico

II

MEDIDA DEL PESO DE LOS CUERPOS. — LA BALANZA DE PRECISIÓN

Determinar el centro de gravedad de un conjunto de cuerpos pesados es un problema que tiene diariamente múltiples aplicaciones en las artes y en las diferentes industrias. Pero hay otra cuestión no menos útil é interesante, cual es la que tiene por objeto medir la intensidad de la resultante cuyo punto de aplicación es el centro de gravedad, ó valiéndonos del lenguaje usual, pesar los cuerpos.

Los instrumentos destinados á este uso han recibido, como nadie ignora, el nombre de *balanzas*. Las balanzas usadas varían mucho en sus formas y en su género de construcción; más adelante las describiremos en detalle. Empecemos por la descripción de la balanza de precisión, única que se usa en las investigaciones científicas.

El principio en que está basada su construcción es el siguiente:

Figura en primer lugar una palanca, barra rígida, que descansa por su punto medio en otro punto fijo, inquebrantable, alrededor del cual puede oscilar libremente, y que se halla en equilibrio cuando se ponen dos fuerzas ó pesos iguales en sus extremos.

Para que una palanca de este género pueda servir de balanza se requiere que en su construcción no se hayan omitido ciertas condiciones de las que vamos á tratar.

Es ante todo preciso que los dos brazos de la palanca ó cruz (fig. 161) AO, OB, sean de igual longitud y del mismo peso, de modo que se equilibren aisladamente. También deben tener exactamente el mismo peso los dos platillos PP, en uno de los cuales se colocan las pesas contrastadas, y en otro los cuerpos que se han de pesar. En segundo lugar, el centro de gravedad del sistema debe estar debajo del punto ó del eje de suspensión, y muy próximo á este eje. Resulta de esta segunda condición que el equilibrio será estable, y que las oscilaciones de la cruz propenderán siempre á hacerla recobrar una posición horizontal, que es la señal característica de la igualdad de peso de los cuerpos situados en los dos platillos de la balanza.

Estas dos condiciones son las únicas necesarias para que la balanza sea exacta, pero no bastan para que sea también sensible, es decir, para que marque hasta la menor disparidad en el peso, en virtud de una inclinación de la cruz fácil de comprobar.

Para que una balanza sea muy exacta y muy sensible, se requiere además:

Que los puntos ó ejes de suspensión del ástil ó cruz y de los platillos estén en la misma línea recta; en este caso la sensibilidad es independiente de la carga que se ponga en los platillos;

Que la cruz tenga bastante longitud y sea todo lo ligera posible; entonces la amplitud de las oscilaciones será mayor para la misma igualdad en los pesos; es el mismo motivo que exige que el centro de gravedad de la balanza esté muy próximo al eje de suspensión de la cruz, sin que á pesar de esto coincida con él.

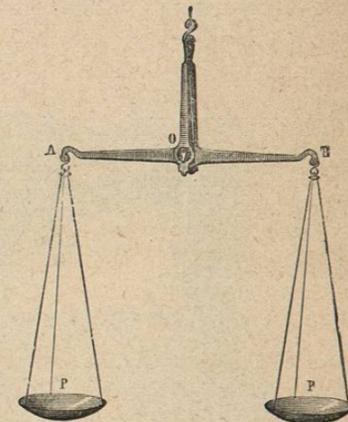


Fig. 161.—Balanza