

CAPÍTULO VI

LA GRAVEDAD EN LOS LÍQUIDOS

I

PROPIEDADES DE LOS CUERPOS EN ESTADO LÍQUIDO

Diariamente ocurren á nuestra vista los fenómenos más curiosos y más dignos de llamarnos la atención, sin que nos fijemos en ellos, y, con mayor motivo, sin que tratemos de averiguar las circunstancias que pueden haberlos producido. Tales son, por ejemplo, las múltiples apariencias con que vemos los cuerpos, ora sólidos, ora líquidos ó gaseosos, ó que pasan sucesivamente por estos tres estados. ¿Qué diferencia hay entre el

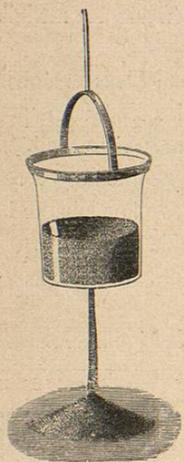


Fig. 39.—Salida de las materias pulverulentas

hielo y el agua? ¿Cómo es que ésta se transforma en vapor? ¿Qué diferencia existe entre la disposición de las moléculas que constituyen las tres formas de una misma substancia? Cuestiones son estas de difícilísima solución, acerca de las cuales posee la ciencia un corto número de datos que tendremos ocasión de recordar en los diferentes capítulos de esta obra: por ahora nos limitaremos á completar lo que hemos dicho ya respecto de las propiedades especiales de los cuerpos líquidos comparadas con las de los sólidos, y á precisar las nociones necesarias para la mejor inteligencia de los fenómenos que vamos á describir.

Hemos dicho que lo que distingue á un cuerpo sólido es la constancia de su forma, cuando no está sometido á fuerzas mecánicas ó físicas capaces de romperle ó de hacerle pasar á un nuevo estado. Consideremos una piedra ó un trozo de metal. Son tan solidarias sus moléculas, que conservan sus mutuas distancias, sin separarse unas de otras á no mediar un esfuerzo exterior más ó menos enérgico. De aquí resulta que la posición del centro de gravedad del cuerpo permanece invariable, y que si una piedra recibe un movimiento cualquiera, ó se la lanza al espacio, ó cae por efecto de la gravedad, todas sus moléculas participarán á la vez y del mismo modo del movimiento. Dase el nombre de *cohesión* (1) á la fuerza que reúne de este modo entre sí las diferentes moléculas de un cuerpo.

lileo compararla con la de las oscilaciones de un péndulo, é ideó un mecanismo fácil de comprender, merced al cual podía alargar ó acortar el hilo de suspensión para obtener la concordancia apetecida, de suerte que cuando un enfermo estaba atacado de calentura, en vez de decir como hoy: "Tiene ciento cuarenta pulsaciones por minuto," se decía: "Marca seis pulgadas y tres líneas en el pulsílogo." Muchos médicos célebres se apresuraron á adoptar esta idea, y hasta hubo algunos que le dispensaron la honra de apropiársela. El metrónomo, que sirve hoy para marcar los diferentes grados del movimiento ó compás en la ejecución de las piezas de música, tiene notable analogía con el pulsílogo de Galileo.

(1) Hay que distinguir con cuidado la cohesión, de esa otra fuerza que reúne los átomos de las substancias heterogéneas. Las partículas más ténues de un pedazo de yeso están reunidas en efecto por la *cohesión*; pero la *afinidad* es la que ha producido la unión química de los átomos de ácido carbónico y de cal de que están formadas las partículas de yeso, así como la del oxígeno con el carbono para dar origen al ácido carbónico, y la del oxígeno con el calcio para formar la cal.

Suele suceder que, cuando se reduce un cuerpo sólido á diminutas partículas, á un polvillo tenue, la cohesión de que tratamos parece, si no anulada, á lo menos considerablemente disminuída. Así es que con trabajo se logra mantener un montón de arena en forma de cono algo elevado, pues los granos resbalan unos sobre otros, y su movimiento á lo largo de la pendiente de la masa tiene cierta analogía con la caída de un líquido por una cuesta. Esta analogía parece todavía mayor cuando se llena de polvo fino una vasija que tenga un agujero en el fondo, pues aquél sale por éste como podría salir una masa líquida (fig. 39). Sin embargo, esta semejanza no pasa de ser aparente, pues por pequeño que sea cada grano, es en sí una masa que goza de todas las propiedades de los cuerpos sólidos, y que en realidad en nada difiere de ellos.

¿Cuál es, pues, físicamente considerado, el carácter especial que distingue á los líquidos de los sólidos?

Consiste este carácter en que, mientras la cohesión molecular es bastante fuerte en los últimos para impedir el movimiento de sus diferentes partes, en los líquidos esta fuerza es, por el contrario, nula ó casi nula. De aquí la extraordinaria movilidad de sus moléculas, que se deslizan ó ruedan unas sobre otras al impulso de la fuerza más leve. A causa de esta movilidad, ninguna masa líquida tiene en sí forma alguna definida, sino que tan luego como se pone en equilibrio adquiere la de la vasija ó cuenca natural que la contiene, y cuyas paredes la impiden que se mueva por efecto de la gravedad.

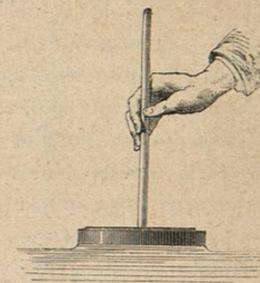


Fig. 40.—Cohesión de las moléculas líquidas



Fig. 41.—Forma esférica de las gotas de rocío

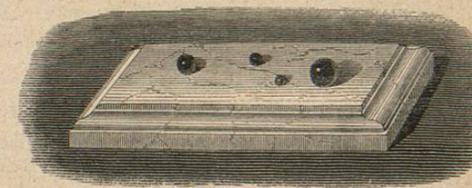


Fig. 42.—Cohesión de las moléculas: gotitas de mercurio

Esto no quiere decir que la cohesión sea enteramente nula; como lo prueba el que cuando una masa líquida está en movimiento sus moléculas cambian de sitio, pero no quedan aisladas, separadas, como si la masa fuese pulverulenta; las distancias que median entre las moléculas no varían, y aunque haya alteración en la forma, el volumen subsiste invariable.

Cuando se pone un disco sólido sobre la superficie de un líquido que lo moja (figura 40), se necesita hacer algún esfuerzo para separarlo de ella, y la capa líquida que se adhiere al disco al retirarlo demuestra que ha sido necesario hacer aquel esfuerzo á causa de la fuerza que unía las moléculas líquidas entre sí. Lo propio sucedería si se introdujese una varilla en un líquido capaz de mojar la substancia de que está aquélla formada,

pues al sacarla se vería que queda suspendida de su punta una gota líquida. Finalmente, la forma esférica que tienen las gotitas de rocío depositadas en las hojas, ó las gotas de mercurio esparcidas por una superficie sólida (figs. 41 y 42), se explica únicamente por la preponderancia de la cohesión molecular sobre la gravedad, que á no ser por ella propendería á extender las pequeñas masas líquidas de que hablamos sobre las superficies que las contienen. Sin embargo, la cohesión es muy débil, como lo prueban la movilidad de las moléculas y la facilidad con que se vence esta cohesión; una masa de agua lanzada desde cierta altura cae al suelo en forma de polvo, lo cual consiste, como hemos dicho ya, en la resistencia del aire. Por lo demás, hay una gran diferencia, bajo este concepto, entre las varias clases de líquidos. Unos son viscosos, y sus moléculas cambian de sitio con suma lentitud, invirtiendo algún tiempo en adquirir la forma de las vasijas que los contienen; á esta clase pertenecen las resinas, y el azufre á determinadas temperaturas. Los cuerpos blandos vienen á formar á modo de una transición entre los sólidos y los líquidos (1). Otros cuerpos, como los éteres, los alcoholes, son líquidos en alto grado y hasta pasan con la mayor facilidad al estado de vapor. Por último, hay cierto número de ellos, como el agua, que ocupa un término medio entre ambos extremos. Más adelante tendremos ocasión de ver que el calor ó la presión ejercen importantísima influencia en estos diferentes estados. Sea lo que fuere de estas diferencias, los fenómenos que vamos á estudiar se presentan en todos los cuerpos líquidos en un grado que varía con su liquidez más ó menos perfecta.

II

PRINCIPIO DE IGUALDAD DE PRESIÓN

Conocidos son los célebres experimentos sobre la compresibilidad de los líquidos, ejecutados á fines del siglo XVIII por los físicos de la Academia del *Cimento*, de Florencia. El agua, ó en términos generales, cualquiera masa líquida, ¿cambia de volumen cuando se la somete á una presión mecánica suficientemente considerable? Tal fué la cuestión planteada por aquellos sabios y que creyeron haber resuelto negativamente. Mandaron fabricar una esfera de plata hueca, la llenaron de agua y en seguida la taparon herméticamente: hecho esto, la comprimieron con gran fuerza, y vieron que el agua se rezumaba por las paredes de la esfera. Hicieron otros experimentos que dieron el mismo resultado, y de ellos dedujeron que los líquidos no disminuyen de volumen por efecto de las mayores fuerzas mecánicas, ó lo que es lo mismo, que son incompresibles.

Pero otros experimentos más recientes han invalidado los de los académicos de Florencia, quedando comprobada la compresibilidad del agua y de otros muchos líquidos. Canton en 1761, Perkins en 1819, Erstedt en 1823, y posteriormente Despretz, Colladon, Sturm, Wertheim y Regnault, han medido con precisión cada vez mayor la reducción de volumen que experimentan diferentes líquidos sometidos á una presión determinada. Con todo, ya tendremos ocasión de ver que esta reducción es sumamente escasa, y tanto, que se puede hacer caso omiso de ella en el estudio de los fenómenos de hidrostática. Procedamos, pues, á la descripción de los principales de ellos.

(1) Con una presión suficiente se puede vencer la cohesión de las moléculas que forman los cuerpos sólidos. M. Tresca ha hecho interesantes experimentos que han puesto en evidencia el hecho, paradójico en la apariencia, de que los sólidos más duros y densos pueden correr á la manera de los líquidos, sin cambiar de estado, cuando se los somete á fortísimas presiones.

Supongamos dos cilindros de diámetro desigual y puestos en mutua comunicación por medio de un tubo que une sus bases (fig. 43). En el interior de cada uno de ellos pueden funcionar dos émbolos perfectamente calibrados, y toda la capacidad del tubo y de los cilindros comprendida debajo de los émbolos está llena de agua. Para que en tal estado haya equilibrio en el aparato, la experiencia demuestra que si la carga del émbolo del cilindro menor, unida á su propio peso, es por ejemplo de 1 kilogramo, el émbolo mayor deberá tener una carga, comprendido su peso, de tantas veces 1 kilogramo cuantas equivalga la superficie de sección del cilindro mayor á la del menor. En el ejemplo representado por la figura 43, 1 kilogramo sirve de equilibrio á 16.

¿No ocurre aquí todo exactamente como si la presión ejercida en la superficie del cilindro menor se transmitiera, sin cambiar de energía y atravesando el líquido, á cada elemento igual de la superficie del cilindro mayor?

Tal es, en efecto, el principio en que está basada la construcción de una máquina de grandísima utilidad para la industria, que describiremos al tratar de las aplicaciones de la gravedad, y que se conoce con el nombre de *prensa hidráulica*.

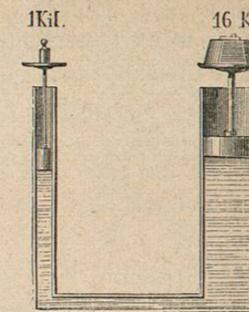


Fig. 43.—Principio de la prensa hidráulica

Pascal fué quien descubrió este principio, consecuencia de la movilidad y de la elasticidad de las moléculas líquidas. He aquí su enunciado general:

Toda presión ejercida en un líquido contenido en una vasija cerrada por todas partes se transmite con igual energía en todos sentidos. Esto significa que si se toma en el líquido ó en las paredes interiores de la vasija una superficie igual á aquella por

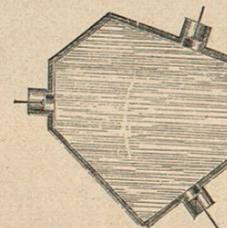


Fig. 44.—La presión ejercida en un punto de una masa líquida se transmite por igual en todos sentidos

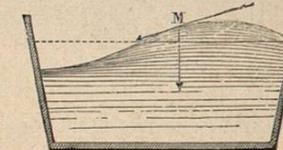


Fig. 45.—La superficie de los líquidos en equilibrio es horizontal

la cual se ejerce la presión, esta superficie experimentará una presión rigurosamente igual á la primera; si la superficie que recibe la presión es doble, triple, cuádruple, etcétera, de la que la transmite, aquella soportará una presión doble, triple ó cuádruple también.

Así pues, si en las paredes de la vasija se abren orificios de cualesquiera dimensiones, para mantener el equilibrio será menester ejercer en los émbolos que cierran dichos orificios presiones proporcionales á su superficie (fig. 44). El enunciado del principio supone que el líquido no es pesado, ó que se hace abstracción de la gravedad. Para poderlo comprobar prácticamente, hay que tener en cuenta, al evaluar las presiones ejercidas ó transmitidas, las que proceden de la gravedad, presiones que el líquido ejerce en sí mismo ó en las paredes de la vasija por su propio peso. El experimento

indicado más arriba (fig. 43) y realizado industrialmente en la prensa hidráulica, es una consecuencia evidente del principio de Pascal.

Hemos visto, y es un hecho de observación del que cualquiera puede cerciorarse, que la dirección de la plomada es perpendicular á la superficie de un líquido en reposo. Fácilmente se comprende que no puede ser de otro modo.

En efecto, cuando por una causa cualquiera la superficie de una masa líquida no es plana y horizontal, una molécula, como por ejemplo M (fig. 45), se halla colocada como sobre un plano inclinado, y en virtud de la movilidad propia de los líquidos propende á deslizarse por la pendiente de este plano obedeciendo á su propio peso; siendo imposible el equilibrio hasta que, cesando la causa de la agitación del líquido, se nivela poco á poco su superficie y vuelva á ser rigurosamente plana y horizontal. Rara vez están tranquilas las grandes superficies líquidas de los mares, de los lagos y hasta de las balsas. Las agitaciones del aire, grandes vientos ó leves brisas, bastan para producir esa multitud de prominencias movilizadas llamadas oleadas, olas ó simples arrugas. Pero, si en vez de considerar solamente una porción limitada, abarcamos con la vista ó con la imaginación una extensión de suficiente radio, ó si la contemplamos desde alguna distancia, las desigualdades se disipan en su conjunto, la masa líquida permanece en reposo, y su superficie tiene toda la apariencia de un plano perfectamente horizontal.

Con todo, debemos recordar que la Tierra es esferoidal, que las verticales de los diferentes lugares no son paralelas, que la verdadera superficie de los mares y de los grandes lagos participa de su curvatura, como lo atestiguan varios fenómenos ópticos que hemos descrito en una de nuestras obras anteriores (EL CIELO). Pero esto mismo viene á confirmar la condición esencial del equilibrio de una masa líquida contenida en una vasija y sometida á la sola acción de la gravedad.

Así pues, la superficie exterior del líquido está siempre á nivel, ó si se quiere, plana y horizontal. Esto en cuanto á su exterior. Veamos ahora lo que pasa en el interior.

III

PRESIÓN DE LOS LÍQUIDOS EN EL FONDO DE LAS VASIJAS

Como cada molécula líquida es pesada, se puede considerar su peso como una presión que se ejerce verticalmente, y que debe transmitirse en todos sentidos á las demás partes del líquido, así como á las paredes de la vasija que lo contiene. ¿Cuál es la resultante de las presiones de todas las moléculas? La experiencia va á decírnoslo.

Valgámonos de un recipiente cilíndrico, sin fondo, sostenido en un trípode de cierta altura (fig. 46). Un disco plano pendiente de un hilo sujeto á uno de los brazos de una balanza, á guisa de platillo, se aplica exactamente sobre los bordes inferiores del cilindro, de modo que le sirve de fondo. Pónese en el otro platillo una tara igual á la diferencia de su peso con el del disco, y por último se agregan pesas marcadas que comprimiendo el disco ú obturador le adaptan exactamente á los bordes del cilindro: en seguida se echa agua en este último. La presión del líquido sobre el fondo movable aumenta poco á poco, y cuando llega á ser igual á las pesas añadidas, el menor exceso de líquido hace que baje el obturador y que se escape el agua; mas como la presión disminuye á causa de este desagüe, el disco vuelve á subir y aplicarse contra el cilindro. La punta de un tornillo que roza la superficie del agua marca el nivel de ésta en el momento del equilibrio

De este primer experimento resulta, como ya debía suponerse, que *la presión ejercida en el fondo de la vasija es precisamente igual al peso del líquido*.

Si repetimos ahora el experimento con una vasija del mismo fondo que el cilindro, pero ensanchada por su parte superior, y por consiguiente de mucho mayor volumen, tendremos exactamente el mismo resultado, es decir, que las mismas pesas sirven de equilibrio á una columna líquida de la propia altura. También se obtiene idéntico resultado si la vasija es más angosta por arriba, con tal que la superficie de la base ó fondo siga siendo la misma.

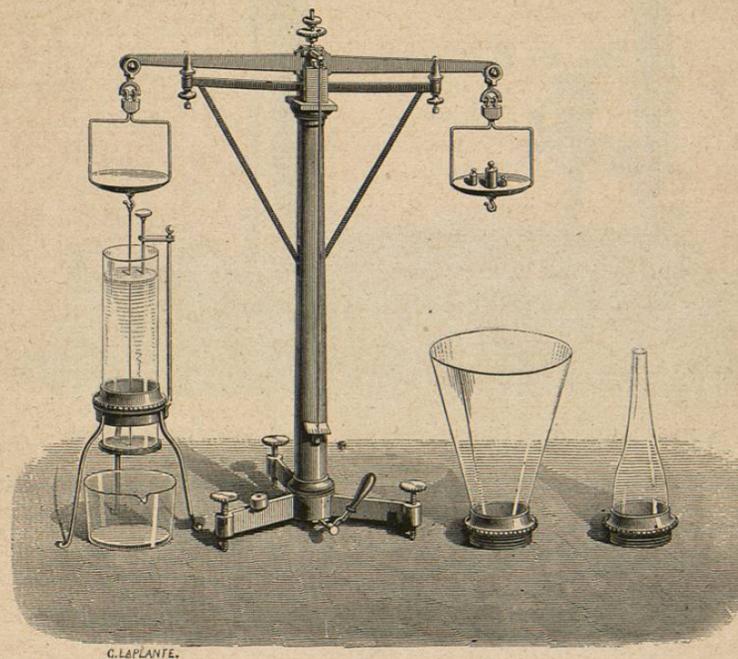


Fig. 46.—Presión de un líquido sobre el fondo de la vasija que lo contiene

Así pues, la presión ejercida por el peso de un líquido sobre el fondo de la vasija que lo contiene es independiente de la forma de aquélla, proporcional á la altura del líquido, é igual al peso de un cilindro líquido que tenga por base el fondo y la misma altura.

La demostración experimental de la primera parte de esta ley se hace con el aparato de Haldat; pero no se obtiene directamente con él la medida de la presión, como en el primer método, sino que ésta se conoce por la elevación de una columna de mercurio en un tubo acodado verticalmente, como lo demuestra la figura 47. Este aparato consta de tres vasijas de formas y capacidades diferentes, pero de sección igual en su respectivo fondo, todas ellas adaptables á un tubo acodado dos veces, el cual contiene mercurio, y junto á cuyo brazo mayor se halla una regla graduada para indicar las oscilaciones de este metal líquido. Un soporte vertical sostiene en su extremo superior una varilla horizontal con un tornillo ó índice que enrasa con la superficie del líquido contenido en la vasija. Atornillando cualquiera de ellas á una armadura puesta al efecto al pie del soporte, y llenándola de agua hasta la punta del índice, el mercurio del

tubo sube hasta un punto fijo. Haciendo salir el agua por una llave de dicha armadura se reemplaza la vasija puesta primero con cualquiera de las otras, y llenándola á su vez de

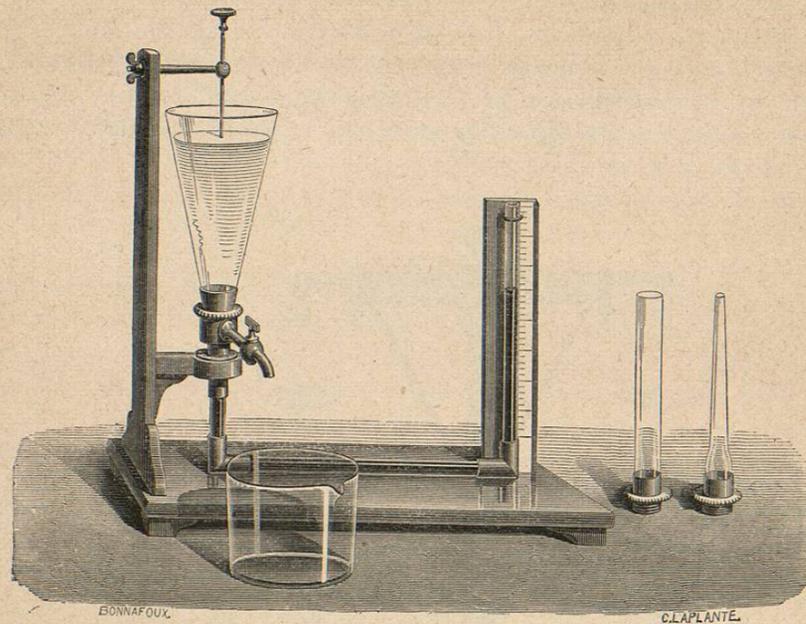


Fig. 47.—Presión de un líquido sobre el fondo de una vasija: aparato de Haldat

agua, vese cómo vuelve á subir el mercurio á la misma altura que antes, demostrándose así que la presión es idéntica sobre su superficie é independiente de la cantidad de agua.

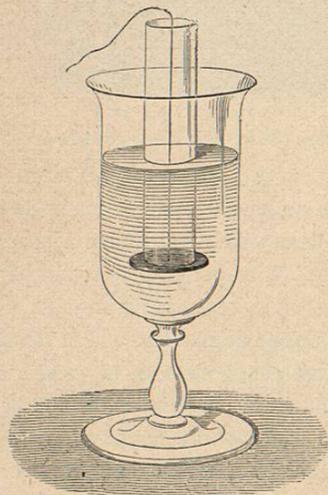


Fig. 48.—Presión de una masa líquida sobre una capa horizontal

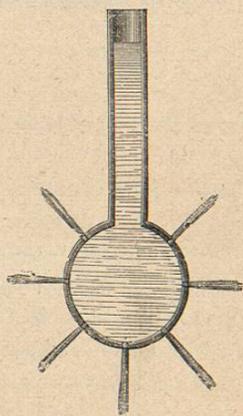


Fig. 49.—Presión normal de los líquidos en las paredes de las vasijas

Si en vez de averiguar el valor de la presión sobre el fondo de la vasija, se quisiera conocer la ejercida en la superficie de una capa líquida interior ó contra las paredes laterales de aquélla, se vería que, á igualdad de superficie y á la misma profundidad,

esta presión es la misma, midiéndose también por el peso de una columna líquida vertical que tenga la superficie comprimida por base, y por altura la del líquido. El experimento siguiente es la demostración de la ley relativa al caso de una superficie tomada en una capa horizontal interior.

Introdúcese verticalmente en una vasija llena de agua (fig. 48) un cilindro abierto por sus dos extremos y provisto de un disco ú obturador movable que le sirve de fondo. Para sumergir dicho cilindro se ha de hacer alguna fuerza, lo cual prueba que el líquido ejerce una presión ó *empuje* de abajo arriba, que mantiene el obturador adherido á los bordes del cilindro é impide que el agua se introduzca en él. Si entonces se echa agua en el tubo, persistirá el equilibrio mientras el nivel interior sea menos elevado que el exterior; pero en el momento en que haya igualdad entre los niveles—ó mejor dicho, un poco antes á causa del peso del disco,—este último cede y queda roto el equilibrio.

Se da siempre el mismo resultado cualquiera que sea la profundidad á que se sumerja el cilindro. De aquí se deduce esta ley:

La presión ejercida en un punto cualquiera de una misma capa horizontal de un líquido en equilibrio bajo la sola acción de la gravedad, es constante y se mide por el peso de una columna líquida que tenga por base el elemento de superficie comprimido, y por altura la profundidad vertical de la capa.

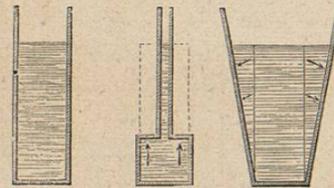


Fig. 51.—Paradoja hidrostática

Del propio modo se miden las presiones laterales en las paredes de las vasijas. Debemos añadir que su esfuerzo es siempre normal, es decir, perpendicular á la superficie de dichas paredes, de suerte que se ejercen en sentido inverso de la gravedad si la pared es horizontal y superior al líquido. Haremos mención de los siguientes experimentos que comprueban el efecto y sentido de estas presiones.

Si se llena de agua un cilindro terminado en una esfera metálica que tenga algunos agujeros en todas direcciones (fig. 49), brota el líquido por todos ellos, siendo la dirección del chorro perpendicular á la porción de superficie de la cual se escapa. En las bombas de regadera, el agua brota en virtud de la propiedad que tienen los líquidos de comprimir lateralmente las paredes de los recipientes que los contienen.

El torniquete ó molinete hidráulico (fig. 50) demuestra á la vez la presión lateral ejercida en dos opuestas direcciones y en los dos extremos de un tubo horizontal aco-

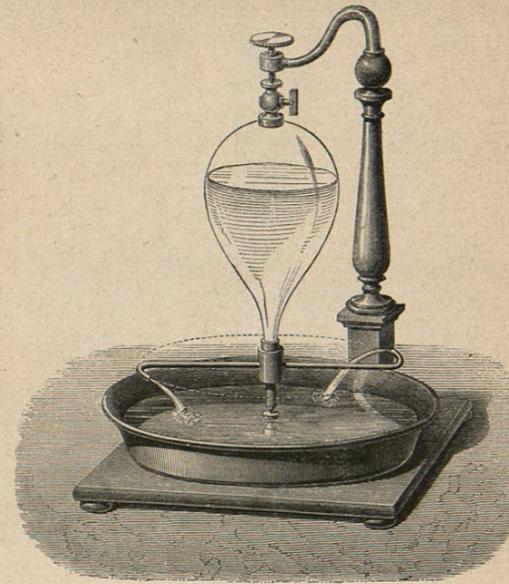


Fig. 50.—Torniquete hidráulico