

dados en sentido contrario. Si este tubo no estuviese abierto, la presión lateral ejercida en el extremo estaría contrabalaceada por otra presión igual y contraria sobre el codo, y el tubo permanecería inmóvil. Pero el orificio practicado en cada extremo produce dos chorros de líquido, y no estando ya contrabalaceada la presión en uno y otro codo, resulta un movimiento de retroceso y por consiguiente de rotación del tubo.

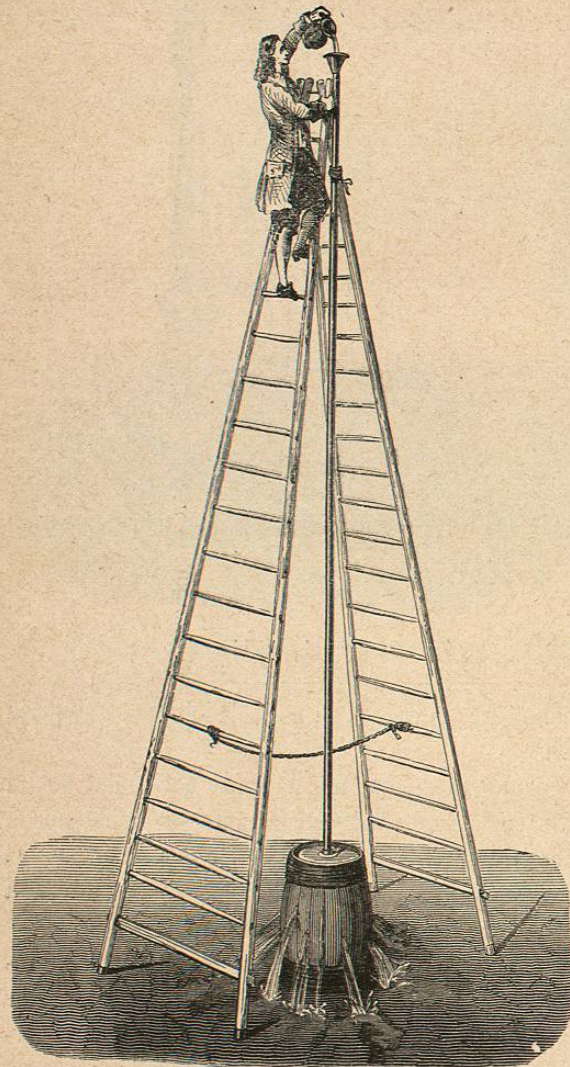


Fig. 52.—Paradoja hidrostática, rompe- toneles de Pascal

experimento este fenómeno, conocido con el nombre de *paradoja hidrostática*; hizo que se abrieran las duelas de un tonel sólidamente construido y lleno de agua y por cuya cubierta superior penetraba un tubo muy estrecho y muy alto, y esto sin más que llenar de agua el tubo, es decir, añadiendo al peso total un peso insignificante (fig. 52). Las paredes del tonel soportaban entonces las mismas presiones que si hubiesen tenido encima una masa de agua cuya base fuera la superficie del tonel y su altura la del tubo. Un kilogramo de agua puede producir de este modo el mismo efecto que millares de kilogramos.

Si en una misma vasija se introducen líquidos de densidades diferentes y no susceptibles de mezclarse, como, por ejemplo, mercurio, agua y aceite, estos líquidos se colo-

locan por orden de densidad. Además, cuando se establece el equilibrio (fig. 53), las superficies de separación son planas y horizontales. Este caso práctico podría preverse por el raciocinio, porque requiriendo un líquido aislado para equilibrarse, según hemos

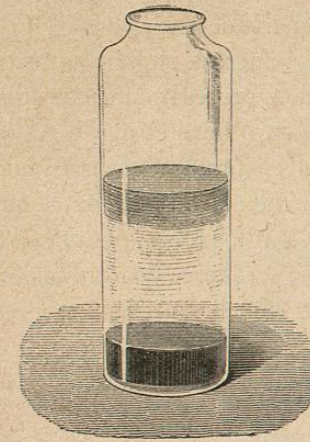


Fig. 53.—Equilibrio de los líquidos superpuestos de densidades diferentes

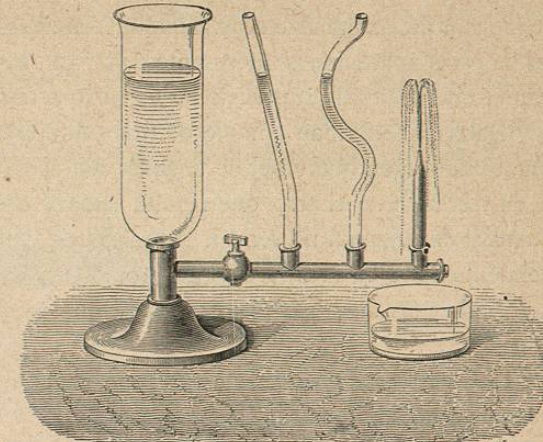


Fig. 54.—Igualdad de altura de un líquido en los vasos comunicantes

visto, que su superficie sea horizontal, este equilibrio no se rompe cuando la superficie soporta además en todos sus puntos las presiones emanadas del líquido superpuesto. Mediante algunas precauciones se pueden equilibrar dos líquidos de densidad casi igual, poniendo el más pesado en la parte superior; pero entonces el equilibrio es inestable, y la menor agitación restablece el orden de las densidades.

El agua de mar es más pesada que la dulce; así es que en los *fiordos* ó golfos de Noruega se ven masas de agua dulce acarreadas por los ríos, las cuales se mantienen á la superficie del agua salada sin mezclarse con ella. Vogt asegura que una de estas masas tenía en un fiordo 1^m,30 de profundidad. Semajante fenómeno no es posible sino en los lugares tranquilos, pues la agitación causada por los vientos mezcla en breve el agua dulce con la salada. Hase observado el mismo caso en el Támesis, á causa de llevar las mareas el agua del mar á una distancia bastante grande por el lecho del río.

El equilibrio de un líquido contenido en una vasija y sometido á la sola acción de la gravedad es independiente de la forma de aquélla. De aquí se deduce la consecuencia natural de que todo líquido se eleva á la misma altura en dos ó muchas vasijas puestas en comunicación entre sí; y en efecto, la experiencia confirma que siempre reina el mismo nivel en los diferentes tubos ó vasos enlazados entre sí por medio de un tubo

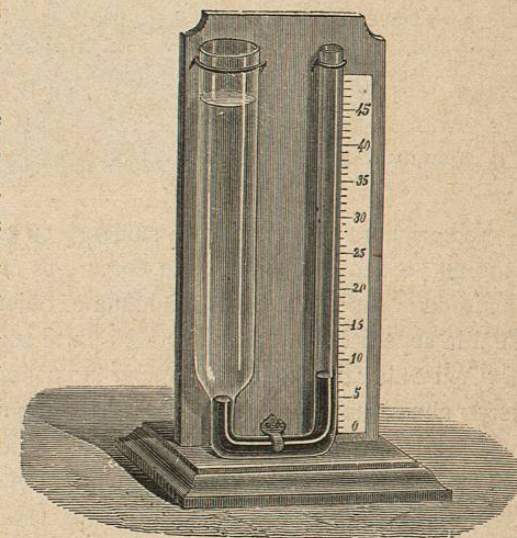


Fig. 55.—Vasos comunicantes. Altura de dos líquidos de densidades diferentes

de cualquier forma, con tal de que el diámetro de cada uno de ellos no sea muy angosto (fig. 54).

Este principio es el que sirve de base para la teoría de los pozos artesianos, para la construcción de las fuentes de surtidor de los jardines públicos ó particulares, y para la distribución de las aguas en las ciudades. En la segunda parte de este volumen trataremos de estas aplicaciones interesantes; por ahora sólo nos interesa el principio teórico. El agua que llega á la superficie de un pozo artesiano suele proceder de capas líquidas muy lejanas, que forman á modo de ríos subterráneos, y cuyo nivel es más elevado en el punto de origen que en el de llegada. Así es que las presiones se transmiten de trecho en trecho, y el chorro que resulta subiría precisamente á la altura misma que el manantial de origen á no ser por la resistencia del aire y por los roces que la columna ascendente sufre en su trayecto. Lo propio sucede con los surtidores que brotan de un receptáculo más alto que el estanque y que comunican con él por conductos subterráneos.

Si dos vasos comunicantes están llenos de líquidos de densidad diferente, las alturas de éstos ya no son iguales (fig. 55).

Echemos primero mercurio, y veremos que el nivel se establece á la misma altura en los dos tubos. Echemos ahora agua en el tubo de la izquierda; el mercurio subirá en el de la derecha por efecto de la presión del nuevo líquido. Establecido el equilibrio, fácilmente se ve que las alturas de los niveles del agua y del mercurio, medidos por encima de su superficie común de separación, están en razón inversa de sus densidades. Por ejemplo, si el mercurio se eleva 3 milímetros, la columna de agua tendrá una longitud de $40^{\text{mm}},8$, es decir, 13,6 veces mayor; luego el agua, á igualdad de volumen, pesa 13,6 veces menos que el mercurio.

VI

EQUILIBRIO DE LOS CUERPOS SUMERGIDOS EN LOS LÍQUIDOS. — PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Nadie ignora que cuando se sumerge en el agua un cuerpo más ligero que ella, como un pedazo de madera ó de corcho, es menester cierto esfuerzo para mantenerlo debajo de la superficie. Si se abandona el objeto á sí mismo, se eleva verticalmente y sale á la superficie, en la cual flota en parte sumergido y en parte fuera del agua.

¿Cuál es la causa de un fenómeno tan conocido? La gravedad. En el aire, el mismo cuerpo abandonado á sí mismo cae verticalmente; en el agua, las presiones laterales, las presiones de arriba abajo y de abajo arriba se destruyen en parte, reduciéndose á un empuje ejercido en sentido inverso de la dirección de la gravedad, empuje al que ya hemos aludido en un experimento anteriormente descrito (fig. 48). Demuéstrase, y la práctica confirma la teoría, que el empuje es precisamente igual al peso del líquido desalojado. El punto de aplicación de esta fuerza, llamado *centro de presión*, es el centro de gravedad del líquido cuyo puesto ocupa el cuerpo.

Siendo la pérdida de peso de que hablamos superior, en los cuerpos más ligeros que el agua, al peso del cuerpo mismo, compréndese que este último debe adquirir un movimiento contrario al que le daría la gravedad, de lo cual resulta la ascensión de un pedazo de madera ó de corcho á la superficie del líquido. Pero los cuerpos más pesados que el agua sufren también semejante pérdida, sea además cualquiera la naturaleza del líquido en que se los introduzca. Sabido es que Arquímedes, uno de los más grandes geóme-

tras y físicos de la antigüedad, tuvo la gloria de descubrir este principio, que lleva su nombre, y cuyo enunciado general es el siguiente:

Todo cuerpo sumergido en un líquido pierde una parte de su peso igual precisamente al del líquido desalojado.

El principio de Arquímedes se demuestra experimentalmente con la balanza hidrostática.

Este aparato consiste en una balanza común, cuyos dos platillos están provistos de un gancho en su cara inferior. Del gancho de un platillo se cuelga un cilindro hueco de metal, cuya capacidad debe ser tan rigurosamente igual al volumen de otro cilindro ma-

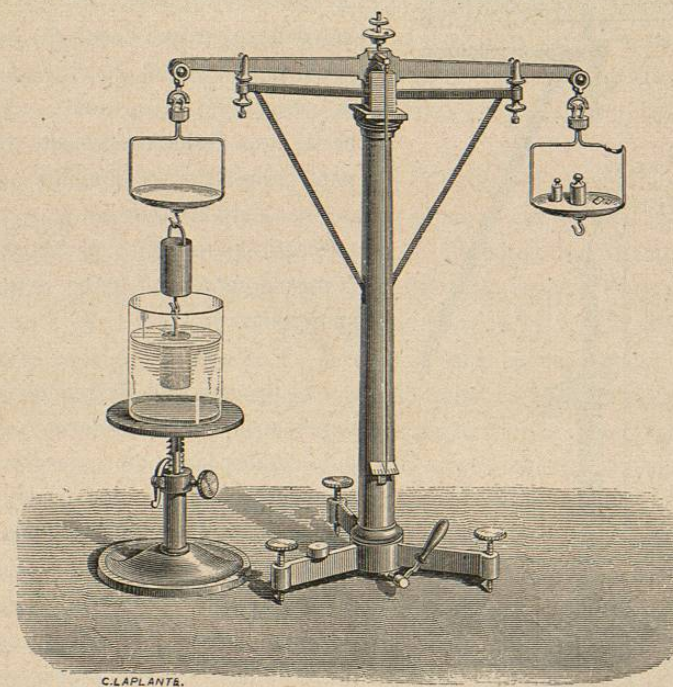


Fig. 56.—Demostración práctica del principio de Arquímedes

cizo, que éste quepa exactamente en él. Ambos cilindros están á su vez provistos de ganchos, de suerte que se puede suspender el macizo del hueco (fig. 56). Hecho esto, se levanta la cruz de la balanza por medio de la cremallera ó barra dentada adaptada á ella, subiéndola lo suficiente para que se pueda colocar un vaso lleno de agua debajo de los dos cilindros, cuando la cruz está perfectamente horizontal.

Para establecer el equilibrio, se ponen pesas en el platillo opuesto. Si entonces se baja la cruz de la balanza, el cilindro macizo se hunde en el agua y queda roto el equilibrio, inclinándose el fiel hacia el platillo que contiene las pesas. Esto sólo bastaría para demostrar el empuje vertical ó la pérdida de peso del cuerpo sumergido. Para medir este empuje, se sumerge enteramente el cilindro macizo, y luego se restablece el equilibrio vertiendo poco á poco agua en el cilindro hueco. La cruz recobra la posición horizontal tan luego como el cilindro hueco está enteramente lleno de líquido.

Así pues, la pérdida de peso es justamente igual al peso del agua que se ha echado, es decir, de la desalojada por el cuerpo sumergido. El experimento que precede demuestra, pues, el principio de Arquímedes con toda evidencia.

Ahora bien: ¿en qué consiste que no se rompe el equilibrio cuando, después de

equilibrar un vaso lleno de líquido y un cuerpo sólido puestos uno junto á otro en el platillo de una balanza, se sumerge el cuerpo sólido en el agua? Acabamos de demostrar que este último pierde de su peso, y sin embargo el equilibrio subsiste. Es absolutamente preciso que el vaso y su contenido hayan aumentado en un peso equivalente, ó si se quiere, que el agua sufra una presión de arriba á abajo igual á la ejercida por ella de abajo á arriba. Esto es lo que sucede efectivamente y lo que se puede comprobar con el aparato antes descrito.

Se pesa un vaso lleno en parte de agua, y luego se introduce en él el cilindro macizo sostenido exteriormente, como se ve en la figura 57. Queda roto el equilibrio: la balanza se inclina hacia el lado del vaso. ¿Cuánto ha aumentado el peso del agua por la inmersión? Precisamente el equivalente al del agua desalojada; y así lo prueba el que para restablecer el equilibrio basta extraer del vaso el volumen de agua estrictamente necesario para llenar el cilindro hueco de la misma capacidad exterior que el cuerpo sumergido.

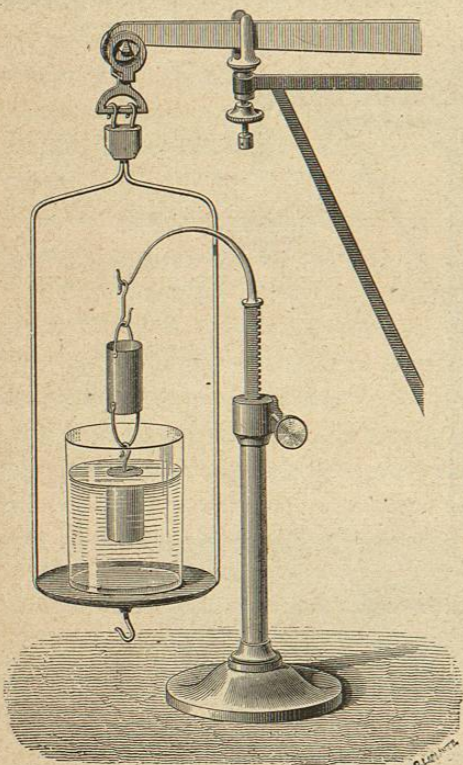


Fig. 57.—Principio de Arquímedes. Reacción de un cuerpo sobre el líquido en que está sumergido

El principio de Arquímedes es de gran importancia teórica. Merced á él se han podido deducir las condiciones de equilibrio de los cuerpos sumergidos ó de los cuerpos flotantes, explicar muchos fenómenos de hidrostática y resolver numerosos problemas del mayor interés práctico. Citaremos algunos ejemplos que así lo demuestran, tomándolos de las observaciones más comunes.

En los fenómenos que se presentan en el seno de los líquidos encontramos á cada paso testimonios fehacientes del empuje ó presión á que hemos hecho referencia. Si cuando tomamos un baño comparamos el esfuerzo que necesitamos hacer para levantar un miembro dentro del agua con el que debemos emplear para levantarlo fuera del líquido, nos llamará la atención la diferencia que advertiremos en favor del primer movimiento. Dentro del agua podemos remover y levantar fácilmente piedras muy voluminosas que con dificultad sostendríamos fuera de ella. Cuando penetramos en un río cuya profundidad aumenta gradualmente, sentimos que disminuye poco á poco la presión de nuestros pies sobre el fondo, hasta que llega un momento en que ya no podemos fijarlos en el suelo para seguir adelante. Nuestro cuerpo, cuyo peso queda casi anulado por el empuje del líquido, propende á tomar una posición horizontal, exigida por el equilibrio inestable en que á la sazón se encuentra.

Esto nos induce á decir algunas palabras acerca de las condiciones de equilibrio de los cuerpos sumergidos en los líquidos, ó capaces de flotar en su superficie.

Desde luego es evidente que un cuerpo sumergido no puede estar en equilibrio si su peso excede al de un volumen igual de líquido, pues en tal caso cae por efecto de la

acción de este exceso de peso sobre el empuje del agua. Tampoco subsistirá en equilibrio si su peso es menor que un volumen igual de líquido; en esta hipótesis subirá á la superficie á causa del predominio del empuje sobre su peso. Por esta razón sobrenadan el corcho, la madera, á lo menos ciertas especies de ella, mientras que la mayoría de los metales, las piedras y una porción de substancias se van al fondo. Como el mercurio es un líquido de mucha densidad, la mayor parte de los metales pueden flotar en su superficie: una bala de plomo, un pedazo de hierro ó de cobre no se hundan en él, al paso que el oro y el platino se van al fondo en seguida.

Réstanos examinar el caso de un cuerpo que, á igualdad de volumen, pese exactamente lo mismo que el líquido. Si su substancia es perfectamente homogénea, el cuerpo permanece en equilibrio en cualquier posición que se le coloque en medio del líquido. En este caso, el peso y el empuje de abajo arriba no tan sólo son iguales y contrarios, sino que ambos ejercen su acción en el mismo punto, es decir, que el centro de gravedad y el centro de presión coinciden.

Los peces suben y bajan á su albedrío en el seno del agua. Largo tiempo se ha creído, y nosotros mismos lo hemos repetido siguiendo el parecer de muchos sabios físicos ó fisiólogos, que lo que hace posible estos diferentes movimientos es la facultad que tienen estos animales de comprimir ó hinchar una especie de bolsa elástica llena de aire, colocada en el abdomen. Según el volumen de la *vejiga natatoria*—tal es el nombre de este órgano,—el cuerpo del pez será ó más ligero ó más pesado que el volumen de agua que desaloja; en el primer caso sube, en el segundo baja. Pero en la actualidad parece demostrado que no son tales las funciones de la vejiga natatoria. No cabe duda de que se dilata y se comprime; pero este cambio de volumen no es un fenómeno voluntario que puede producir el animal según sus necesidades de locomoción. En realidad la vejiga se dilata cuando el pez se eleva sobre cierto nivel en el cual se halla en equilibrio, gracias á la igualdad de su densidad con la del agua. Entonces, en efecto, si se eleva, la presión del líquido disminuye, ocurriendo la expansión del gas contenido en el órgano bajo la influencia de esta disminución. Pero si el pez desciende bajo el nivel de equilibrio, como la presión exterior aumenta, la vejiga se contrae, y siendo ya más denso que el agua, caería hasta el fondo si permaneciera inmóvil; por lo cual se remonta de nuevo merced á sus esfuerzos musculares.

Los experimentos recientes del fisiólogo M. A. Moreau han puesto en evidencia que los peces no pueden aumentar ó disminuir á su albedrío el volumen de su vejiga, como se creía hasta aquí. Pero lo que sí es cierto, y esto nos basta para la cuestión que consideramos, es que si cambia el volumen de la vejiga por cualquier circunstancia, como la densidad del animal varía en sentido inverso, resultan de esta variación movimientos que son una confirmación del principio de Arquímedes. Por ejemplo, si se coloca un pez en un aparato en el que llegue la presión á cinco ó seis atmósferas, se entorpece hasta el punto de caer al fondo de la vasija y de no poder elevarse en seguida sino á costa de enérgicos esfuerzos musculares. Por el contrario, cuando un pez ha mordido el anzuelo á gran profundidad, se remonta á pesar suyo á la superficie, aun cuando consiga desprenderse de aquél en el camino. Acontece entonces que la vejiga revienta por efecto de una expansión excesiva, saliendo las vísceras fuera del cuerpo del animal. Debemos añadir que no á todos los peces les sucede esto, pues algunos de ellos, como las rayas, los tiburones, las lampreas, el escombros del Océano, etc., no tienen vejiga. De todos modos resulta que el calificativo de *natoria*, aplicado á la vejiga de los peces, es inexacto.

M. Delaunay cita en su *Curso de mecánica* un fenómeno bastante curioso que se explica fácilmente por el principio de Arquímedes.

“Cuando se introduce una uva en una copa llena de Champagne, dice, esta uva cae inmediatamente al fondo de la copa. Pero el ácido carbónico que se desprende continuamente del vino, se acumula en breve en forma de burbujillas alrededor del grano. Formando cuerpo estas burbujas de gas con la uva, aumentan su volumen sin que su peso crezca de un modo notable; el empuje del líquido, que al principio era menor que el peso del grano, no tarda en sobreponerse á éste, y el grano sube hasta la superficie del Champagne. Si se da entonces una ligera sacudida á la uva para desprender las burbujas de ácido carbónico que se habían adherido á su superficie, baja de nuevo al

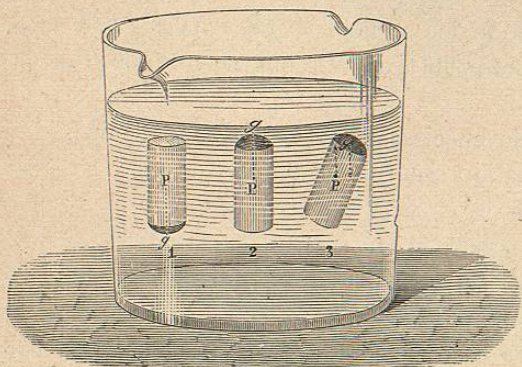


Fig. 58.—Equilibrio de un cuerpo sumergido en un líquido de la misma densidad que la suya

fondo de la copa; y al cabo de algún tiempo, vuelve á subir otra vez. De este modo puede continuarse el experimento, mientras siga desprendiéndose ácido carbónico.”

Si el cuerpo sumergido no es homogéneo; si, por ejemplo, es un compuesto de corcho y plomo, cuyo peso total sea el del agua desalojada (figura 58), sin que los dos cuerpos tengan el mismo centro de gravedad, el centro de gravedad g del conjunto y el centro de presión P no coinciden ya.

Para que haya equilibrio es menester que ambos puntos estén en una misma vertical, como en las posiciones 1 y 2; y por otra parte, el equilibrio sería inestable si el centro de gravedad estuviese en la parte superior. Como la posición 3 no reúne esta condición, tampoco habrá equilibrio hasta que el cuerpo, después de algunas oscilaciones, haya tomado la posición 1.

Cuando un cuerpo desaloja un volumen de líquido cuyo peso es superior al suyo—lo cual puede consistir en la diferencia de densidades ó en la forma del cuerpo,—flota á la superficie.

En este caso, el agua desalojada por la parte sumergida equivale, en cuanto á su peso, al del cuerpo juntamente con el de la carga que soporta; así, por ejemplo, el casco de un buque, y su cargamento en hombres, material y mercancías, pesan reunidos precisamente lo mismo que el volumen de agua de mar desalojado debajo de la línea de flotación. Por otra parte, la segunda condición de equilibrio es también la misma, esto es, que el centro de gravedad del cuerpo y el de presión deben estar en una misma vertical. Mas por lo que hace á la estabilidad, no es indispensable ya que el primer punto esté debajo del otro. Además, según la posición del cuerpo flotante y su forma, la del volumen desalojado cambia á su vez, variando también el centro de presión, de suerte que las condiciones de equilibrio varían naturalmente á cada momento.

Jamás existe en los buques un equilibrio perfecto, rigurosamente hablando, ni aun cuando el mar está terso y tranquilo. Siempre hay en ellos oscilaciones de mayor ó menor amplitud, por lo cual claramente se comprende que lo esencial es que, en las circunstancias más desfavorables, los movimientos del barco no sean tan bruscos que lo hagan zozobrar.

En los mares inmediatos á los polos se encuentran con frecuencia grandes masas de

hielo, conocidas de los marinos que navegan por aquellas regiones con el nombre de *icebergs* (montes de hielo). Por lo general son enormes fragmentos desprendidos de los espacios de mar helados, ó que se han deslizado al mar desde los glaciares del polo.

No es raro encontrar algunas de estas masas flotantes que se elevan, ora presentando formas regulares (fig. 59), ora cual fantásticas arcadas, á alturas que varían entre 30 y 60 metros sobre el nivel del mar. Ahora bien, partiendo de la ley de equilibrio de los cuerpos flotantes, y considerando que la densidad del hielo no excede

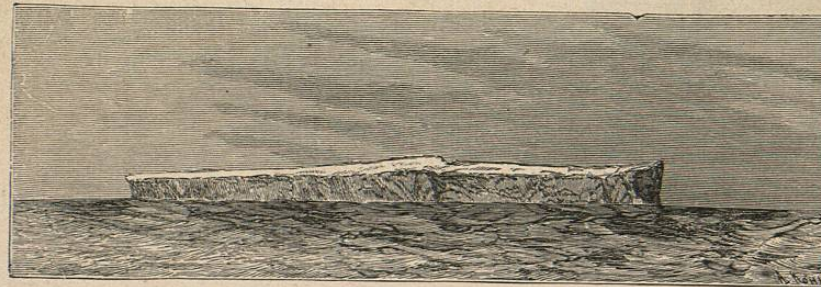


Fig. 59.—Icebergs de las regiones australes

de 0,918, al paso que la del agua de mar es de 1,026, debe deducirse que la parte sumergida del iceberg tiene un volumen siete ú ocho veces igual al de la masa emergida, y por consiguiente un témpano de forma regular, de 30 á 60 metros de altura, tendrá un espesor total de 250 á 500 metros.

CAPÍTULO VII

GRAVEDAD DEL AIRE Y DE LOS GASES

I

EL AIRE Y LOS DEMÁS GASES SON PESADOS, ELÁSTICOS Y COMPRESIBLES

Vivimos en el fondo de un océano fluido, cuya profundidad media es por lo menos cien veces mayor que la de los mares, y que envuelve por todas partes al esferoide terrestre. La substancia de que está formado este mar es el aire, mezcla de varias substancias gaseosas, siendo las dos principales el oxígeno y el nitrógeno; también contiene ácido carbónico, vapor de agua y á veces amoníaco, mas en proporciones variables, al paso que los dos primeros gases se encuentran en la misma relación en todas partes. Esta relación es, poco más ó menos, en un volumen igual á 100, de 21 de oxígeno y 79 de nitrógeno.

Nadie ignora que el aire es el alimento indispensable de la respiración de los animales; y hasta los que viven en el agua no pueden pasar sin él; otro tanto debemos decir respecto de los vegetales que, bajo la influencia de la luz, descomponen el ácido carbónico del aire, absorben el carbono y restituyen el oxígeno, tan necesario para la respiración animal.

No es posible ver el aire, á lo menos en un espacio de reducida extensión, á causa de su gran transparencia; pero á largas distancias, la interposición de las capas gaseosas