Capítulo Sexto

PROPIEDADES DE LOS LIQUIDOS Y LOS GASES

Un Mar en El Que No Se Puede Ahogar Nadie

Este mar existe y se encuentra en un país que conoce la humanidad desde los tiempos más remotos. Se trata del célebre Mar Muerto de Palestina. Sus aguas son extraordinariamente saladas, hasta tal punto que en él no puede existir ningún ser vivo. El clima caluroso y seco de Palestina hace que se produzca una evaporación muy intensa en la superficie del mar. Pero se evapora agua pura, mientras que la sal se queda en el mar y va aumentando la salinidad de sus aguas. Esta es la razón de que las aguas del Mar Muerto contengan no un 2 ó 3 por ciento (en peso) de sal, como la mayoría de los mares y océanos, sino un 27 o más por ciento. Esta salinidad aumenta con la profundidad. Por lo tanto, una cuarta parte del contenido del Mar Muerto está formada por la sal que hay disuelta en el agua. La cantidad total de sal que hay en este mar se calcula en 40 millones de toneladas.

La gran salinidad del Mar Muerto determina una de sus peculiaridades, que consiste en que sus aguas son mucho más pesadas que el agua de mar ordinaria. Hundirse en estas aguas es imposible. El cuerpo humano es más liviano que ellas.

El peso de nuestro cuerpo es sensiblemente menor que el de un volumen igual de agua muy salada y, por consiguiente, de acuerdo con la ley de la flotación, el hombre no se puede hundir en el Mar Muerto, al contrario, flota en su superficie lo mismo que un huevo en agua salada (aunque en el agua dulce se hunde).

Mark Twain estuvo en este lago-mar y después escribió humorísticamente las extrañas sensaciones que él y sus compañeros experimentaron bañándose en sus aguas:

"Fue un baño muy divertido. No nos podíamos hundir. Se podía uno tumbar a lo largo sobre la espalda y cruzar los brazos sobre el pecho y la mayor parte del cuerpo seguía sobre el agua. En estas condiciones se podía levantar la cabeza por completo. Se puede estar tumbado cómodamente sobre la espalda, levantar las rodillas hasta el mentón y abrazarlas con las manos. Pero en este caso se da la vuelta, porque la cabeza resulta más pesada. Si se pone uno con la cabeza hundida y los pies para arriba, desde la mitad del pecho hasta la punta de los pies sobresale del agua; claro que en esta posición no se puede estar mucho tiempo. Si se intenta nadar de espaldas no se avanza casi nada, ya que las piernas no se hunden en el agua y sólo los talones encuentran apoyo en ella. Si se nada boca abajo no se va hacia adelante, sino hacia atrás. En el Mar Muerto el equilibrio del caballo es muy inestable, no puede ni nadar ni estar derecho, inmediatamente se tumba de costado".

En la fig. 51 se puede ver un bañista que descansa comodísimamente sobre las aguas del Mar Muerto. El gran peso específico del agua le permite estar en esta posición, leer el libro y protegerse con la sombrilla de los ardientes rayos del Sol.

El agua de Kara-Bogas-Gol (golfo del Mar Caspio)[1] tiene estas mismas propiedades y las del lago Eltón no son menos saladas, puesto que contienen un 27% de sal.

[1] El peso específico de las aguas del golfo Kara-Bogas-Gol es 1,18. "En un agua tan densa como ésta se puede nadar sin ningún esfuerzo, y es imposible hundirse sin faltar al principio de Arquímedes"- señalaba refiriéndose a estas aguas el investigador A. D. Pellsh.

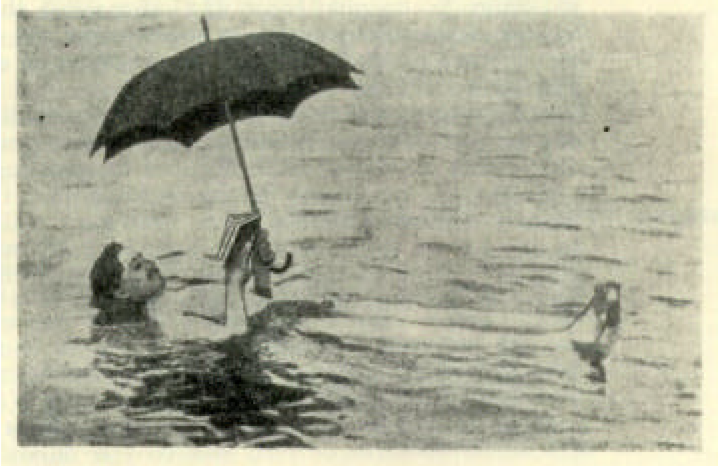

Fig. 51. Un bañista en el Mar Muerto (reproducción de una fotografía).

Algo parecido sienten los enfermos que toman baños salinos. Cuando la salinidad del agua es muy grande, como ocurre, por ejemplo, con las aguas minerales de Staraia Russa, los enfermos tienen que hacer no pocos esfuerzos para mantenerse en el fondo del baño. Yo he oído como una señora que tomó los baños de Staraia Russa se quejaba de que el agua "la echaba materialmente fuera del baño". Según ella la culpa de esto la tenía ... la administración del balneario.

El grado de salinidad de las aguas de los distintos mares oscila un poco y a esto se debe que los barcos no se sumerjan en ellas hasta un mismo sitio. Algunos de nuestros lectores habrán visto el signo que llevan los barcos cerca de la línea de flotación, llamado "marca de Lloyd", que sirve para indicar el nivel límite de la línea de flotación en aguas de distinta densidad. Por ejemplo, la marca representada en la fig. 52 indica los niveles límite de la línea de flotación siguientes:

en agua dulce (Fresh Water)	FW
en el Océano Indico (India Summer)	IS
en agua salada en verano (Summer)	S
en agua salada en invierno (Winter)	W
en el Atlántico del norte en invierno (Winter North Atlantik)	WNA

Antes de terminar este artículo quiero advertir que existe una variedad de agua que aún estando pura, es decir, sin contener otros cuerpos, es sensiblemente más pesada que la ordinaria. Este agua tiene un peso específico de 1,1, es decir, es un 10% más pesada que la común, por consiguiente, en una piscina con agua de este tipo lo más probable es que no se ahogue nadie, aunque los que se bañen no sepan nadar. Este agua se llama agua "pesada" y su fórmula química es D_20 (el hidrógeno que entra en su composición está formado por átomos dos veces más pesados que los del hidrógeno ordinario. Este hidrógeno se designa con la letra D). El agua "pesada" se encuentra disuelta en el agua común en cantidades muy pequeñas. Un cubo de agua potable contiene cerca de 8 g de agua "pesada".

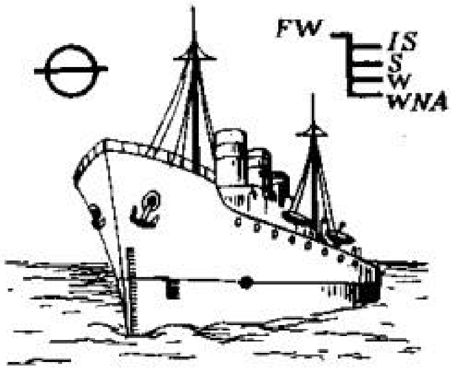

Fig. 52. Disco de carga máxima en el costado de un buque. Las marcas se hacen al nivel de la línea de flotación. Para que se vean mejor se muestran aparte aumentadas. El significado de las letras se explica en el texto.

El agua pesada de fórmula D_2O (hay 17 tipos de agua pesada, cuyas composiciones son distintas) se obtiene actualmente casi pura, puesto que la cantidad de agua ordinaria que hay en ella constituye aproximadamente un 0,05%. Este agua se emplea mucho en la técnica atómica, especialmente en los reactores atómicos. Se obtiene en grandes cantidades del agua ordinaria por procedimientos industriales.
Volver al inicio

¿Como Funciona Un Rompehielos?
Si cuando tomamos el baño, antes de abandonar la bañera, destapamos el agujero de desagüe y seguimos tumbados en el fondo, notaremos que a medida que baja el agua y que nuestro cuerpo va saliendo de ella nos hacemos más pesados. De esta forma podemos convencernos de que el peso que pierde un cuerpo al sumergirse en el agua (recordemos qué ligeros nos sentimos en el agua) vuelve a reaparecer en cuanto dicho cuerpo se encuentra fuera de ella. Cuando una ballena hace involuntariamente este experimento, quedándose varada durante una bajamar, las consecuencias son fatales para ella. Resulta aplastada por su monstruoso peso. No es, pues, casual que las ballenas vivan en el elemento acuático, cuyo empuje las libra de la acción desastrosa de la gravedad.
Lo que acabamos de decir guarda estrecha relación con el encabezamiento del presente artículo. El funcionamiento del rompehielos se basa en este mismo principio físico. La parte del buque sacada del agua deja de estar equilibrada por el empuje de ésta y adquiere su peso "en seco". No hay que creer que los rompehielos cortan el hielo sobre la marcha, ejerciendo sobre él una presión continua con su proa, es decir, con la roda. Así funcionan *los cortahielos*. Pero este procedimiento sirve únicamente cuando el hielo tiene un espesor relativamente pequeño.
Los verdaderos rompehielos marítimos, como, por ejemplo, los célebres en su tiempo "Krasin" y "Ermak" o los modernos, como el rompehielos atómico "Lenin", funcionan de otra forma. Estos rompehielos tienen unas máquinas muy poderosas que les permiten montar sobre la superficie del hielo toda la parte de la proa, que para esto precisamente se hace muy sesgada debajo del agua. Cuando la proa del barco sale del agua recobra todo su peso y esta enorme carga (que en el "Ermak", por

ejemplo, era de 800 t) presiona sobre el hielo y lo rompe. Los rompehielos tienen generalmente unas cisternas especiales a proa, que llenas de agua ("lastre líquido") sirven para intensificar la acción rompedora del buque.

Por este procedimiento trabaja el rompehielos mientras que el espesor del hielo no pasa de medio metro. Los hielos más poderosos se vencen *por percusión* del barco sobre ellos. El rompehielos retrocede, toma impulso y embiste con toda su masa el borde del hielo. En este caso lo que actúa no es el peso, sino la energía cinética del buque en movimiento. El rompehielos se transforma en una especie de proyectil de pequeña velocidad, pero de enorme masa, o en un ariete. Los bancos de hielo de varios metros de altura se rompen por la energía de los repetidos golpes que reciben de la sólida proa del rompehielos.

N. Markov, marino polar que participó en la célebre expedición del rompehielos "Sibiriakov" en el año 1932, describe el trabajo de este buque de la manera siguiente:

"Entre centenares de montañas de hielo y en medio de una capa helada continua dio comienzo la lucha del "Sibiriakov". La flecha del telégrafo de máquinas estuvo 52 horas seguidas saltando desde "atrás a toda máquina" a "adelante a toda máquina". Durante trece turnos marinos de cuatro horas el "Sibiriakov" tomaba impulso y penetraba en el hielo desmenuzándolo con su proa, se montaba en él, lo rompía y volvía a retroceder. Abrirse paso en un hielo que tenía tres cuartos de metro de espesor era difícil. A cada golpe avanzábamos en una tercera parte del casco".

La URSS posee los rompehielos más grandes y poderosos del mundo. El primer rompehielos atómico, el "Lenin", es capaz de avanzar sin detenerse por hielo de dos metros de espesor. Su reactor atómico le permite navegar varios años sin recargar combustible. En los próximos años se van a construir en la Unión Soviética otros rompehielos atómicos.

Volver al inicio

¿Donde Están Los Barcos Hundidos?

Existe el criterio, incluso entre los hombres de mar, de que los barcos que se hunden en el océano no llegan al fondo, sino que permanecen como suspendidos entre dos aguas a cierta profundidad, donde el agua "está comprimida por la presión de las capas superiores".

Este criterio era, por lo visto, compartido por el autor de "Veinte mil leguas de viaje submarino", puesto que en uno de sus capítulos Julio Verne describe un barco hundido que se encontraba inmóvil como suspendido en el agua, y en otro, recuerda los barcos que "se pudren manteniéndose libremente dentro del agua".

¿Es verdad esta afirmación?

Al parecer existe cierto fundamento para ella, puesto que la presión del agua en las profundidades del océano alcanza realmente grados muy elevados. A la profundidad de 10 m la presión del agua es igual a 1 kg por cada centímetro cuadrado del cuerpo sumergido. A 20 m de profundidad esta presión es ya de 2 kg; a 100 m, de 10 kg y a 1.000 m, de 100 kg. La profundidad del océano es de varios kilómetros en muchos sitios y en las partes más profundas del Océano Pacífico llega a 11 km (en la fosa de las Marianas). Es fácil calcular la enorme presión que debe experimentar el agua y los objetos sumergidos en ella en estas profundidades tan grandes.

Si una botella vacía y tapada se sumerge hasta bastante profundidad y se extrae luego, resulta que la presión del agua mete el tapón dentro de la botella y ésta se llena de agua. El eminente oceanógrafo John Murray, en su libro "Océano", cuenta que se hizo el siguiente experimento: tres tubos de vidrio de distintas dimensiones, soldados por ambos extremos, se envolvieron en un lienzo, se colocaron en un cilindro de cobre con orificios para que el agua pudiera entrar libremente y fueron sumergidos hasta la profundidad de 5 km. Cuando sacaron el cilindro, el lienzo estaba lleno de una masa que parecía nieve. Esto es lo que quedó de los tubos de vidrio. Unos trozos de madera sumergidos hasta una profundidad semejante, cuando los sacaron estaban tan comprimidos que se hundían en el agua como si fueran ladrillos.

Parecía natural esperar que una presión tan monstruosa debería condensar hasta tal punto el agua en las grandes profundidades, que ni los objetos pesados se hundirían hasta el fondo, lo mismo que una pesa no se hunde en el mercurio. Pero esta opinión carece de fundamento. La experiencia demuestra que el agua, lo mismo que los demás líquidos, apenas si cede a la presión. El agua sometida a una presión de 1 kg por 1 cm^2 se comprime solamente en una fracción de su volumen igual a 1/22.000. Si se sigue aumentando la presión, la compresión por kilogramo sigue siendo aproximadamente la misma. Si se quiere que el agua tenga la densidad necesaria para que el hierro flote en ella, hay que comprimirla hasta que su volumen sea 8 veces menor. Para conseguir que su volumen se reduzca a la mitad se necesita una presión de 11.000 kg por cm^2 (si la medida de compresión antedicha se cumpliera a tan grandes presiones). Esta presión es la correspondiente a una profundidad de 110 km bajo el nivel del océano.

De aquí se deduce, que es inútil hablar de cualquier condensación sensible del agua en las profundidades de los océanos. En los sitios más profundos, la condensación del agua es igual a 1.100/22.000, es decir, de un veintavo de su densidad normal, o sea, de un 5%[2]. Esto casi no puede influir en las condiciones de flotación de los diversos cuerpos, tanto más, cuando los objetos sólidos sumergidos en este agua están sometidos a esta misma presión y, por consiguiente, también se condensan.

Por esto no cabe la menor duda de que los barcos hundidos se encuentran en el fondo del océano. "Todo lo que se hunde en un vaso de agua - dice Murray -, debe irse al fondo del océano más profundo".

Yo he tenido ocasión de escuchar la siguiente objeción a lo antedicho: Si un vaso se introduce en el agua *boca abajo,* con precaución, puede quedarse en esta posición, puesto que desaloja un volumen de agua cuyo peso es igual al del vaso. Un vaso metálico más pesado puede mantenerse en una posición semejante a un nivel más bajo que el del agua, sin llegar a bajar hasta el fondo. De la misma forma parece natural que pueda quedarse entre dos aguas un crucero o un buque cualquiera que se hunda con la quilla hacia arriba. Y si en algunos compartimentos del buque queda aire encerrado, el buque se sumergirá hasta una profundidad determinada y se quedará allí. En realidad no son pocos los barcos que se van a pique invertidos y es posible que algunos de ellos no lleguen al fondo, sino que se queden suspendidos entre las oscuras profundidades del océano. Sería suficiente un leve impulso para hacer que cualquiera de estos barcos perdiera el equilibrio, diera la vuelta, se llenara de agua y se fuera al fondo, pero, ¿de dónde puede proceder un impulso en las profundidades del océano? Aquí reina eternamente el silencio y la quietud; hasta aquí no llegan ni los ecos de las tormentas.

Todos estos argumentos se basan en un error físico. *Ningún vaso puede penetrar solo* en el agua estando invertido, para que esto ocurra tiene que intervenir una *fuerza exterior,* lo mismo que para hacer que se hunda un trozo de madera o una botella vacía tapada. De la misma forma, ningún barco

---

[2] El físico inglés Tate calculó, que si dejara de existir de repente la gravedad y el agua se hiciera imponderable, el nivel de los océanos subiría, por término medio, en 35 m (como consecuencia de que el agua comprimida recobraría su volumen normal). "El océano inundaría 5.000.000 km^2 de tierras firmes, que deben su existencia como tales a la compresibilidad de las aguas de los océanos que las rodean" (Berget).

con la quilla hacia arriba se va a pique: en esta posición seguirá flotando en la superficie del agua. Si el buque se hunde no se puede quedar en la mitad del camino entre el nivel del mar y su fondo.
Volver al inicio

Como Se Realizaron Los Sueños de Julio Verne y De Wells
Los submarinos de hoy no sólo han alcanzado al fantástico "Nautilus" de Julio Verne, sino que incluso lo han superado. Es verdad que la velocidad de los cruceros submarinos actuales es la mitad de la del "Nautilus", es decir, de 24 nudos contra 50 que tenía el de Julio Verne (un nudo es igual a 1,8 km por hora). El trayecto más largo recorrido por un submarino moderno es la vuelta al mundo, mientras que el capitán Nemo realizó un viaje dos veces más largo. Pero el "Nautilus" tenía un desplazamiento de 1.500 t solamente, su tripulación la formaban dos o tres decenas de hombres y podía mantenerse debajo del agua no más de 48 horas seguidas. El crucero submarino "Surcouf", construido en Francia en el año 1929, tenía un desplazamiento de 3.200 t, una tripulación de 150 hombres y era capaz de permanecer debajo del agua hasta 120 horas seguidas[3].
La travesía desde los puertos franceses hasta la isla de Madagascar fue realizada por este crucero submarino sin entrar en ningún puerto. Los compartimentos habitables del "Surcouf" quizá no fueran menos cómodos que los del "Nautilus". Pero el "Surcouf" tenía una ventaja indudable sobre el buque del capitán Nemo. Sobre la cubierta de este crucero submarino había un angar impermeable en el que se alojaba un hidroavión de exploración. El "Nautilus" carecía de periscopio, aparato que permite observar el horizonte estando sumergido.
Sólo hay un aspecto en el que los submarinos reales tardarán mucho en alcanzar la creación de la fantasía del novelista francés. No referimos a la profundidad de inmersión. No obstante, hay que advertir que en este aspecto la fantasía de Julio Verne se sale de los límites de la verosimilitud. "El capitán Nemo - leemos en una parte del libro -, descendió hasta tres, cuatro, cinco, siete, nueve y diez mil metros de profundidad bajo la superficie del océano". En una ocasión el "Nautilus" bajó a una profundidad extraordinaria ... ¡hasta 16 mil metros! "Yo sentía - relata el héroe de la novela - cómo temblaban los sujetadores del revestimiento de hierro del submarino, cómo flexionaban sus riostras, cómo cedían hacia adentro las ventanas forzadas por la presión del agua. Si nuestro buque no tuviera la resistencia de un cuerpo de fundición macizo, la presión lo aplastaría en el acto".
Este temor era realmente fundado, puesto que a 16 km de profundidad (si existiera esta profundidad en algún océano) la presión del agua debería alcanzar la cifra de

$$16.000:10 = 1.600 \text{ kg por } 1 \text{ cm}^2$$

ó 1.600 atmósferas técnicas. Esta presión no trituraría al hierro, pero indudablemente aplastaría al submarino. Pero la Oceanografía moderna desconoce la existencia de semejantes profundidades. No

[3] En la actualidad un submarino con propulsión atómica le da al hombre la posibilidad de elegir cualquier camino en las casi desconocidas profundidades de los mares y océanos. Sus casi inagotables reservas de energía permiten recorrer enormes trayectos sin emerger. En el año 1958 (desde el 22 de julio hasta el 5 de agosto) el submarino atómico norteamericano "Nautilus" realizó sumergido la travesía desde el Mar de Bering hasta Groenlandia, pasando por la región del Polo Norte. Los submarinos atómicos también han hecho posible el viaje alrededor del mundo sin salir a flote. *(N. de la R.)*

obstante, en la época de Julio Verne (la novela está escrita en el año 1869) existía esta idea exagerada de las profundidades marinas, que era debida a la imperfección de los procedimientos que se empleaban para medir dichas profundidades. En aquellos tiempos las sondalezas iban sujetas no con alambre, sino con cuerdas de cáñamo. Estas sondas eran retenidas por el frotamiento con el agua, que aumentaba al aumentar la profundidad. A grandes profundidades este rozamiento aumentaba tanto, que la sonda no se hundía más por más cuerda que se soltase. Esta última se enredaba, dando la impresión de que la profundidad era enorme.

Los buques submarinos de hoy pueden soportar presiones poco mayores de 30 atmósferas. Esto determina que su profundidad máxima de inmersión sea de 300 m. Se han podido alcanzar profundidades mucho mayores en unos aparatos especiales llamados "batisferas" que se emplean para el estudio de la fauna de las vorágines oceánicas. Pero estos aparatos no se parecen al "Nautilus" de Julio Verne, sino a la creación de la fantasía de otro novelista, es decir, a la esfera de gran profundidad que Wells describe en su narración "En el fondo del mar". El héroe de esta narración se sumergió hasta el fondo del mar, a una profundidad de 9 km, en una gruesa esfera de acero. Este aparato se sumergía sin cables, pero tenía una carga (lastre) eliminable. Una vez alcanzado el fondo del océano la esfera soltaba el lastre y subía rápidamente a la superficie.

En las batisferas se han conseguido profundidades mayores de 900 m. Estos aparatos se sumergen con un cable desde un buque, con el cual mantienen comunicación telefónica los tripulantes de la esfera. Recientemente se han hecho unos aparatos llamados batiscafos, para la investigación a grandes profundidades, en Francia, bajo la dirección del ingeniero Willm, y en Italia, según el proyecto del profesor belga Piccard (fig. 53).

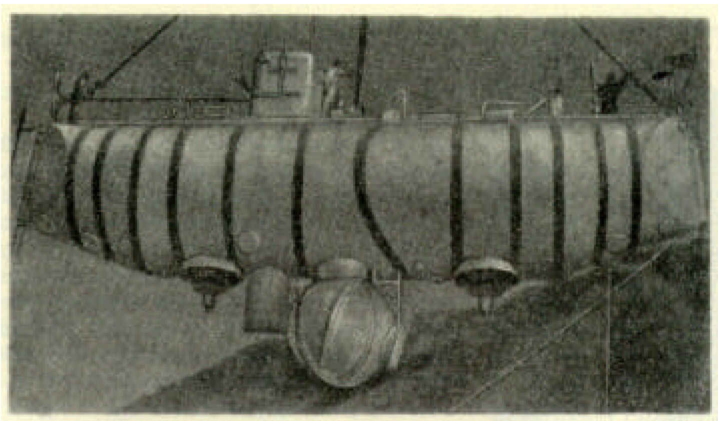

Fig. 53. Batiscafo de Piccard antes de la inmersión (1957).

Estos aparatos se diferencian de las batisferas en que se pueden mover, es decir, navegar a grandes profundidades, mientras que las batisferas permanecían colgadas de cables. Piccard se sumergió primeramente en un batiscafo hasta más de 3 km; después, los franceses Houot y Willm pasaron la siguiente frontera y alcanzaron la profundidad de 4.050 m. En noviembre de 1959 se descendió en batiscafo hasta 5.670 m, pero esto tampoco era el límite. El 9 de enero de 1960 el profesor Piccard hizo una inmersión de hasta 7.300 m y el 23 de enero su batiscafo alcanzó en el fondo de la fosa de las

Marianas la profundidad de ... ¡11,5 km! Según los datos modernos ésta es la mayor profundidad del mundo.
[Volver al inicio]

¿Como Se Izó El "Sadko"?

En las amplias extensiones del océano perecen anualmente millares de buques grandes y pequeños, sobre todo en tiempo de guerra. Ultimamente se han comenzado a recuperar ("salvar") del fondo del mar los barcos más valiosos y asequibles. Los ingenieros y buzos soviéticos que forman las "Expediciones para trabajos submarinos especiales" (la sigla rusa es EPRON) se hicieron célebres en el mundo entero por haber recuperado eficazmente más de 150 grandes buques. Uno de los mayores fue el rompehielos "Sadkó", que se hundió el año 1916 en el Mar Blanco por negligencia de su capitán. Después de estar en el fondo del mar 17 años, este magnífico rompehielos fue izado por los operarlos de las EPRON y volvió a prestar servicio.

La técnica que se emplea para izar los buques se basa por entero en el principio de Arquímedes.

Los buzos hicieron en el fondo del mar, debajo del buque hundido, 12 túneles y a través de ellos hicieron pasar unas bandas de acero fortísimas. Los extremos de estas bandas se sujetaron a unos flotadores, previamente hundidos junto al rompehielos. Este trabajo se realizó a 25 metros de profundidad.

Servían de flotadores (fig. 54) unos cilindros de hierro huecos y estancos que tenían 11 metros de longitud y 5,5 metros de diámetro. Cada uno de estos flotadores pesaba estando vacío 50 t. Su volumen, que se puede calcular fácilmente por las reglas de la Geometría, era de 250 metros cúbicos. Está claro que semejante cilindro vacío debe flotar en el agua, puesto que desaloja 250 t de agua y pesa solamente 50 t. Su poder de elevación será igual a la diferencia entre 250 t y 50 t, es decir, a 200 t. Para que el flotador se hunda no hay más que llenarlo de agua.

Cuando (véase la fig. 54) los extremos de las bandas de acero (bragas) estuvieron bien sujetos a los flotadores hundidos, se comenzó a inyectar aire comprimido en estos últimos. A 25 m de profundidad el agua presiona con una fuerza de 25/10 + 1 atmósferas, es decir, de tres atmósferas y media. El aire se inyectaba en los flotadores a cerca de 4 atmósferas, por lo tanto, podía expulsar el agua que había en ellos. Los cilindros así aligerados eran empujados por el agua circundante hacia la superficie del mar, con una fuerza enorme. Ascendían en el agua lo mismo que un globo en el aire. Su fuerza de elevación conjunta (los flotadores eran 12) era de 200 * 12, es decir, de 2.400 t.

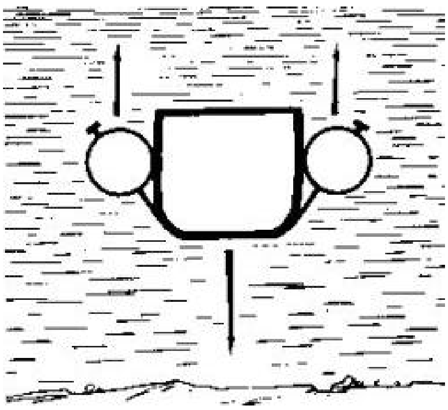

Fig. 54. Esquema del salvamento del rompehielos "Sadkó"; se muestra el corte del rompehielos, los flotadores y las bragas.

Esto excedía el peso del "Sadkó", por lo que los flotadores sólo se vaciaron de agua parcialmente, para que el izado fuera más suave.

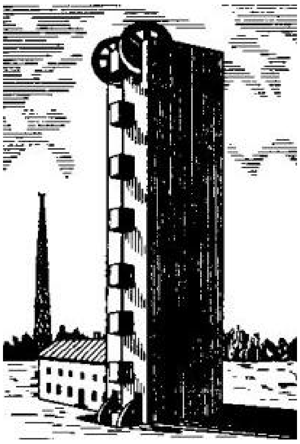

Fig. 55. Proyecto de un supuesto "móvil perpetuo" hidráulico.

A pesar de todo la recuperación solamente se consiguió después de varias tentativas infructuosas. "Cuatro averías sufrió el equipo de salvamento antes de que su empresa se viera coronada por el éxito - escribe T.I. Bobritski, ingeniero naval jefe de las EPRON y director de los trabajos -. Tres veces, cuando esperábamos con impaciencia la aparición del buque, vimos subir, en lugar del rompehielos, los flotadores, que inesperadamente salían a flote envueltos en un caos de olas, espuma y mangas desgarradas que se enrollaban como serpientes. El rompehielos asomó dos veces, pero volvió a desaparecer antes de emerger definitivamente y de quedar a flote".

[Volver al inicio](#)

Un Móvil "Perpetuo" Hidráulico

Entre los muchos proyectos de móvil "perpetuo"(o perpetuum mobile) hay bastantes que se fundan en la emergencia de los cuerpos en el agua. Uno de ellos es el siguiente. Una torre de 20 m de altura está llena de agua. En las partes más alta y más baja de esta torre hay dos poleas unidas entre sí por un cable resistente que hace las veces de correa sin fin. A este cable van sujetos 14 cajones cúbicos de un metro de altura. Estos cajones están hechos de chapas de hierro unidas con remaches y son completamente estancos. Las figs. 55 y 56 representan respectivamente el aspecto exterior de esta torre y su corte longitudinal.

¿Cómo funcionaba este artificio? Todo el que conozca el principio de Arquímedes comprenderá que los cajones que se encuentran dentro del agua tenderán a subir a la superficie. Les obligará a subir una fuerza igual al peso del agua que desalojan, es decir, un metro cúbico de agua multiplicado por el número de cajones que están hundidos en este líquido.

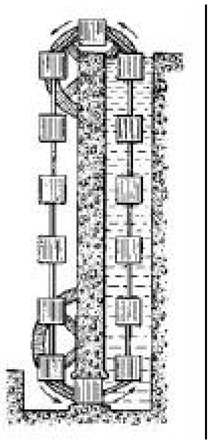

Fig. 56. Corte de la torre de la figura anterior.

Como puede verse en la figura, dentro del agua habrá siempre seis cajones. Por lo tanto, la fuerza que empuja hacia arriba a los cajones será igual al peso de 6 m^3 de agua, es decir, a 6 t. Estos mismos cajones serán arrastrados hacia abajo por su propio peso, pero esta acción está compensada con el peso de los 6 cajones que cuelgan del cable libremente en la parte exterior de la torre.

De esta forma, el cable tendido de la forma antes indicada estará sometido continuamente a una tracción de 6 t, aplicada a uno de sus lados y dirigida hacia arriba. Está claro que esta fuerza obligará al cable a girar ininterrumpidamente, pasando por las poleas, y a cada vuelta podrá realizar un trabajo igual a 6.000X20=120.000 kgm.

Si sembramos todo el país de torres de este tipo podemos obtener una cantidad infinita de trabajo, suficiente para cubrir todas las necesidades de la economía nacional. Estas torres podrán hacer girar los rotores de multitud de dinamos y dar cuanta energía eléctrica sea necesaria.

Pero si analizamos bien este proyecto, veremos que el cable no se puede mover en absoluto.

¿Por qué? Pues, porque para que el cable sin fin dé vueltas, los cajones deben entrar en el pozo de agua de la torre por abajo y salir de él por arriba. Pero para poder entrar en el pozo el cajón tiene que *vencer la presión que sobre él ejerce una columna de agua de 20 m de altura.* Como el cajón tiene una superficie lateral de un metro cuadrado, la presión sobre él será igual, ni más ni menos, que 20 t (el peso de 20 m^3 de agua). La tracción hacia arriba es de 6 t solamente, por lo tanto, es insuficiente para hacer que el cajón entre en el pozo.

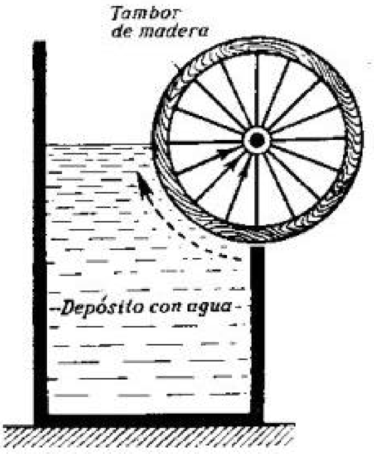

Fig. 57. Otro proyecto de móvil "perpetuo" hidráulico.

La mayoría de los modelos de móviles "perpetuos" hidráulicos han sido ideados por inventores fracasados, pero entre ellos se pueden encontrar algunas variantes muy sencillas e ingeniosas.
Véase, por ejemplo, el modelo representado en la fig. 57. Un tambor de madera sujeto a un eje se encuentra sumergido parcialmente en agua. Si el principio de Arquímedes es cierto, esta parte sumergida del tambor deberá emerger, y si el empuje del agua es mayor que el rozamiento del tambor en el eje, la rotación no deberá interrumpirse jamás. De todos modos, tampoco hay que darse prisa a construir este móvil "perpetuo". El fracaso sería seguro. El tambor ni se movería. ¿Por qué? Porque no hemos tenido en cuenta la dirección en que actúan las fuerzas. Estas últimas estarán dirigidas siempre perpendicularmente a la superficie del tambor, es decir, siguiendo los radios del mismo hacia el eje. Y todos sabemos por experiencia que no es posible hacer girar una rueda aplicándole una fuerza a lo largo de un radio. Para que la rueda gire hay que aplicar la fuerza en dirección perpendicular a su radio, es decir, tangencialmente a la circunferencia. Ahora está claro por qué también en este caso sería un fracaso la construcción del móvil "perpetuo".
El principio de Arquímedes alimentó la imaginación de los buscadores del móvil "perpetuo" y despertó el deseo de inventar dispositivos muy ingeniosos con objeto de aprovechar la aparente pérdida de peso creando una fuente "permanente" de energía mecánica. Pero ninguno de estos intentos fue, ni podía ser, coronado por el éxito.
Volver al inicio

¿Quien Ideo La Palabra "Gas"?

La palabra "gas" es una de aquellas que, como "termómetro", "electricidad", "galvanómetro", "teléfono" y antes "atmósfera" fueron ideadas por los hombres de ciencia. Entre todas estas palabras "gas" es sin duda la más corta. El químico y médico holandés Van Helmont (1577-1644), contemporáneo de Galileo, dedujo la palabra "gas" de la griega caos (xaog). Cuando descubrió que el aire consta de dos partes, una, que mantiene la combustión y se consume, y otra, que no presenta estas cualidades, Helmont escribió:

"He llamado *gas* a este vapor, porque casi no se diferencia *del caos* de los antiguos" (el sentido inicial de la palabra "caos" era el de espacio vacío).

Pero esta palabra nueva no se empezó a utilizar hasta muchos años después, siendo el insigne Lavoisier quien la resucitó en el año 1789. Por fin se extendió universalmente cuando empezó a hablarse de los vuelos de los hermanos Montgolfier en los primeros globos de aire caliente.

Lomonósov llamó en sus obras "fluidos elásticos" a los cuerpos en estado gaseoso (esta denominación perduraba cuando el autor de este libro estudiaba en la escuela). A Lomonósov le corresponde el mérito de haber introducido en el idioma ruso una serie de palabras que ahora son comunes en el lenguaje técnico; entre ellas figuran:

atmósfera	manómetro
barómetro	micrómetro
cristalización	óptica
materia	eléctrico y otras.

El genial precursor de las ciencias naturales rusas escribía con este motivo lo siguiente:

"Me he visto obligado a buscar palabras para designar algunos instrumentos físicos, acciones y objetos naturales que, aunque al principio parecerán algo raras, espero que con el tiempo y el uso acabarán siendo ordinarias".

Volver al inicio

Un Problema Que Parece Fácil

Un recipiente de treinta vasos de capacidad está lleno de agua. Ponemos un vaso debajo del grifo que tiene el recipiente, abrimos y, reloj en mano, observamos cuánto tiempo tarda el vaso en llenarse hasta los bordes. Supongamos que tarda medio minuto. Nos planteamos la pregunta: ¿cuánto tiempo tardará el recipiente en vaciarse por completo, si dejamos el grifo abierto?

Parece que se trata de un problema aritmético para niños pequeños. Si el agua que cabe un vaso tarda en salir 1/2 minuto, los 30 vasos que caben en el recipiente tardarán en salir 15 minutos.

Pero si ustedes hacen este experimento verán que el recipiente no tarda en vaciarse un cuarto de hora, sino media hora.

¿Qué ocurre?

El cálculo que hemos hecho es fácil pero erróneo. El agua no sale con la misma *velocidad* desde el principio hasta el fin. Después de salir el primer vaso, el chorro de agua tendrá ya menos presión, puesto que el nivel dentro del recipiente habrá bajado, por lo tanto, el segundo vaso tardará más de medio minuto en llenarse. El tercero saldrá aún más despacio y así sucesivamente.

La velocidad con que un líquido sale por el orificio de un recipiente abierto depende directamente de la altura de la columna de agua que hay sobre dicho orificio. El genial Torricelli, discípulo de Galileo, fue el primero que estableció esta dependencia expresándole con la sencilla fórmula siguiente:

$$v = \sqrt{2gh}$$

donde v es la velocidad de salida, g la aceleración de la gravedad y *h* la altura del nivel del líquido sobre el orificio.

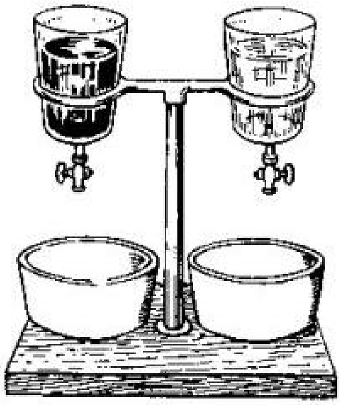

Fig. 58. ¿Qué recipiente se vaciará antes, el que tiene mercurio o el que tiene alcohol? El nivel de los líquidos es igual en los dos recipientes.

De esta fórmula se deduce que la velocidad con que sale el chorro no depende en absoluto de la *densidad* del líquido, es decir, el alcohol, a pesar de ser ligero, y el mercurio, a pesar de ser tan pesado, saldrán a la misma velocidad si están a un mismo nivel (fig. 58). Según esta fórmula, en la Luna, donde la gravedad es seis veces menor que en la Tierra, el vaso del problema anterior tardaría en llenarse dos veces y media más que en nuestro planeta.

Pero volvamos a nuestro problema. Si después de haber salido del recipiente 20 vasos de agua el nivel de ésta en aquél (a partir del orificio del grifo) ha bajado hasta la *cuarta* parte, el vaso 21° se llenará dos veces más despacio que el 1°. Y si después desciende el nivel hasta la novena parte, los últimos vasos tardarán *tres* veces más tiempo en llenarse que el primero. Cuando el recipiente está casi vacío el agua sale muy despacio. Resolviendo este problema por los procedimientos que se estudian en matemáticas superiores se puede demostrar que el tiempo que tarda el recipiente en vaciarse por completo *es el doble* del que tardaría en salir la misma cantidad de líquido si el nivel inicial permaneciera constante.

Volver al inicio

El Problema Del Deposito

Desde lo que acabamos de decir no hay más que un paso a los famosos problemas de los depósitos de los cuales no prescinde ni un solo libro de aritmética o de álgebra. Todos recordamos los clásicos y aburridos problemas escolásticos del tipo que sigue:

"Un depósito tiene dos tuberías, una de entrada y otra de salida. El agua que entra por la primera, estando la segunda cerrada, puede llenar el depósito en cinco horas. Cuando se abre solamente la segunda el depósito se vacía en 10 horas. ¿Cuántas horas tardará en llenarse el depósito si se abren las dos tuberías a la vez?"

Hace cerca de 20 siglos que se conocen los problemas de este tipo, es decir, desde la época de Herón de Alejandría. Uno de los problemas de Herón, no tan difícil como sus sucesores, es el siguiente:

Tenemos cuatro fuentes y un depósito grande.
La primera en un día lo pone rebosante.
La segunda tarda dos en hacer lo que aquélla
Y la tercera, en tres, no será menor que ellas.
(Para igualarlas, cuatro necesita la cuarta).
¿Qué tiempo tardará el depósito en llenarse,
Si se abren las cuatro fuentes en el mismo instante?

Hace dos mil años que se resuelven problemas sobre depósitos y, tanta es la fuerza de la rutina, que llevamos dos mil años *resolviéndolos mal.* ¿Por qué? Ustedes mismos lo comprenderán después de lo que acabamos de decir en el artículo anterior sobre la salida del agua. ¿Cómo se enseña a resolver los problemas de los depósitos? El problema que mencionamos más arriba como típico, por ejemplo, se suele resolver así: la primera tubería llena en 1 hora 1/5 de depósito; la segunda, en este mismo tiempo, vacía 1/10 del mismo; por consiguiente, cuando están abiertas las dos el agua del depósito aumentará en 1 hora 1/5-1/10=1/10, de donde resulta que para que llene el depósito por completo hacen falta 10 horas. Pero este razonamiento es falso, porque si la entrada de agua se puede considerar que ocurre a presión constante y, por consiguiente, de manera uniforme, con la *salida* no se puede hacer lo mismo, puesto que se realiza mientras varía el nivel del agua en el depósito y, por lo tanto, de manera no *uniforme.*

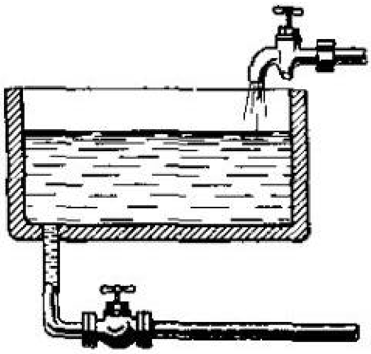

Fig. 59. El problema del depósito

Por medio de la segunda tubería el depósito se vacía en 10 horas, pero de este hecho no se puede sacar la conclusión de que por este tubo sale 1/10 parte del agua del depósito cada hora. Como vemos el procedimiento que se sigue en las escuelas es erróneo. Estos problemas no se pueden resolver correctamente valiéndose de las matemáticas elementales, por lo tanto, los problemas sobre depósitos *(con salida de agua)* deben ser excluidos de los libros de problemas de aritmética[4].
Volver al inicio

[4] El lector puede encontrar un análisis detallado de este tipo de problemas en mi libro '*¿Sabe usted Física?*"

Un Recipiente Extraordinario

¿Se puede construir un recipiente del cual siempre salga el agua en chorro uniforme, es decir, sin que su corriente pierda velocidad, a pesar de que el nivel del líquido descienda? Después de lo que hemos dicho en los artículos anteriores pensarán ustedes que este problema no tiene solución.

Sin embargo se trata de una cosa perfectamente realizable. El frasco representado en la fig. 60 tiene precisamente esta extraordinaria propiedad. Como puede verse es un frasco ordinario de gollete estrecho, provisto de un tapón atravesado por un tubo de vidrio. Si abrimos el grifo C, que está más bajo que el extremo del tubo, el líquido saldrá por él en chorro uniforme hasta que el nivel del agua dentro del frasco llegue a estar más bajo que el extremo inferior del tubo. Si bajamos el tubo hasta que su extremo se encuentre cerca del nivel del grifo, podemos conseguir que todo el líquido que se halle por encima del nivel de su agujero salga uniformemente, aunque el chorro sea débil.

¿Por qué ocurre esto? Para comprenderlo examinemos mentalmente lo que pasa en el recipiente cuando se abre el grifo C (fig. 60). Al salir el agua su nivel va bajando dentro del frasco. Esto hace que el aire que hay en la parte superior se enrarezca. Pero entonces, a través del tubo de vidrio, y pasando por debajo del agua, penetra aire del exterior. Este aire forma burbujas al infiltrarse a través del agua y después se acumula sobre ella en la parte superior del frasco. En este caso la presión es igual a la atmosférica hasta llegar al nivel B. Por lo tanto el agua sale por el grifo C impulsada por la presión que ejerce la capa de agua BC, puesto que la presión atmosférica se equilibra dentro y fuera del frasco. Y como el espesor de la capa BC permanece constante, no tiene nada de particular que el chorro corra siempre con la misma velocidad.

Pero ahora se nos plantea una nueva pregunta ¿cómo saldrá el agua si quitamos el tapón B, que se encuentra al nivel del extremo del tubo? *No saldrá en absoluto* (se entiende que esto ocurrirá si el orificio es tan pequeño que su anchura se puede despreciar; de lo contrario el agua saldrá por él presionada por una delgada capa de líquido cuyo espesor será igual a la anchura del agujero). Esto se explica, porque en este caso la presión interna y la externa serán iguales a la atmosférica y, por consiguiente, no habrá nada que estimule la salida del agua.

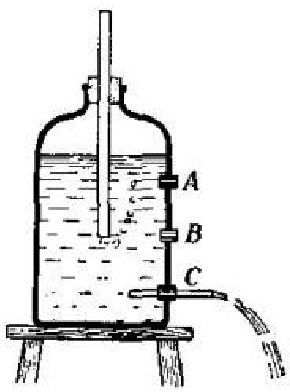

Fig. 60. Esquema del frasco de Mariotte. El agua sale del orificio uniformemente.

Y si quitamos el tapón *A*, que está más *arriba* del extremo inferior del tubo, no sólo no saldrá agua del frasco, sino que entrará en él aire del exterior. ¿Por qué? Por una razón muy sencilla, porque en esta parte del frasco la presión del aire interior *es menor* que la de la atmósfera exterior.

Este recipiente, de propiedades tan interesantes, fue ideado por el notable físico francés Edmond Mariotte y se conoce con el nombre de "frasco de Mariotte".
Volver al inicio

Una Carga De Aire

A mediados del siglo XVII los habitantes de Regensburg y los poderosos príncipes de Alemania, encabezados por su emperador, llegados a esta ciudad, fueron testigos de un espectáculo extraordinario: 16 caballos, tirando con todas sus fuerzas, intentaron inútilmente separar dos semiesferas de cobre unidas entre sí por simple contacto. ¿Qué unía entre sí a estas dos semiesferas? "Nada", el aire. Y no obstante, ocho caballos tirando hacia un lado y ocho tirando hacia otro no pudieran separarlas. De esta forma el burgomaestre Otto Von Guericke demostró públicamente que el aire es algo que tiene peso y que presiona con bastante fuerza sobre todos los objetos que hay en la Tierra.
Este experimento fue realizado con toda solemnidad el día 8 de mayo de 1654. El sabio burgomaestre supo interesar a todo el mundo con sus investigaciones científicas, a pesar de que esto ocurría en una época en que los desbarajustes políticos y las guerras asoladoras estaban en su apogeo.
En los libros elementales de Física figura la descripción del famoso experimento de los "hemisferios de Magdeburgo". No obstante, estoy seguro de que el lector escuchará con gusto esta descripción hecha por el propio Guericke, el "Galileo alemán", como llaman a veces a este célebre físico. El libro, bastante voluminoso, en que se describe la larga serie de sus experimentos apareció en Amsterdam el año 1672; estaba escrito en latín y como los demás libros de esta época tenía un título muy largo, que hemos creído interesante reproducir.

OTTO VON GUERICKE
los llamados nuevos experimentos de Magdeburgo sobre
EL ESPACIO VACIO,
descrito inicialmente por el profesor de matemáticas de
la Universidad de Wurzburgo KASPAR SCHOTT.
Edición del propio autor,
más detallada y aumentada con otros
nuevos experimentos.

El capítulo XXIII está dedicado al experimento que nos interesa. A continuación incluimos su traducción literal.
"Experimento para demostrar que la presión del aire une dos hemisferios tan fuertemente que 16 caballos no pueden separarlos".

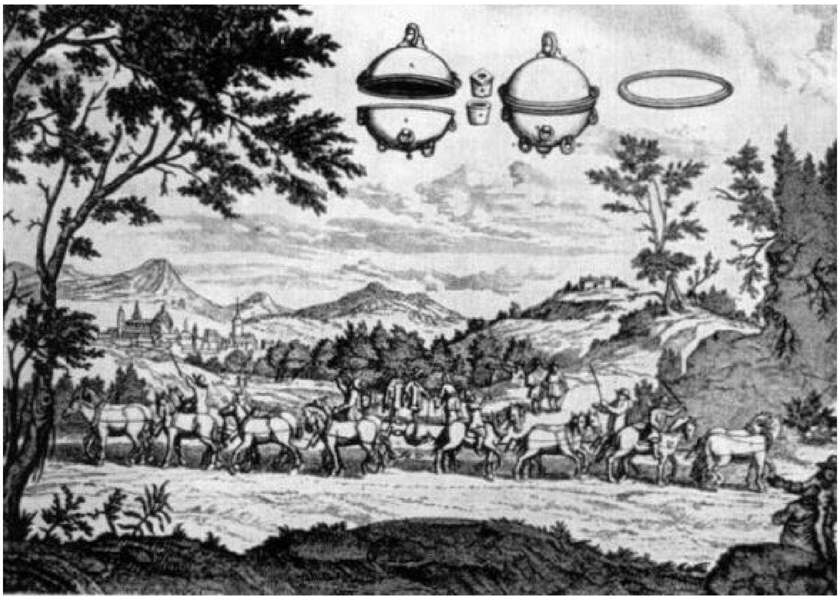

Fig. 61. Experimento con los "hemisferios de Magdeburgo". Ilustración del libro de Otto Von Guericke.

"Encargué dos hemisferios de cobre de tres cuartos de codo de Magdeburgo de diámetro[5]. Pero en realidad sus diámetros midieron solamente 67/100 de codo, ya que los maestros, como de ordinario, no pudieron hacer exactamente lo que era necesario. Ambos hemisferios se correspondían bien entre sí. Uno de ellos tenía una llave que permitía extraer el aire interior y evitaba la entrada del aire exterior. Los hemisferios tenían además cuatro argollas, por las cuales pasaban los cordeles que se sujetaban a los atalajes de los caballos. También hice que cosieran un anillo de cuero; este anillo, impregnado en una mezcla de cera y aguarrás y cogido entre los dos hemisferios no dejaba que el aire entrase en ellos. En la llave se enchufó el tubo de la máquina neumática y se extrajo el aire de dentro de la esfera. Entonces se puso de manifiesto la fuerza con que ambas esferas se apretaban entre sí a través del anillo de cuero. La presión del aire exterior las apretaba con tal fuerza, que 16 caballos (de un tirón) no las podían separar o lo conseguían con dificultad. Cuando los hemisferios, cediendo a la fuerza de los caballos, se separaban, producían un estampido como un cañonazo.

Pero si se abría la llave y se dejaba entrar el aire, los hemisferios se podían separar fácilmente con las manos".

Un cálculo sencillo puede aclararnos por qué hace falta tanta fuerza (8 caballos por cada lado) para separar las dos partes de la esfera vacía. El aire ejerce una presión aproximada de 1 kg por cada cm^2. La superficie del círculo[6] que tiene 0,67 codos (37 cm) de diámetro será igual a 1.060 cm^2. Por lo tanto, la presión de la atmósfera sobre cada hemisferio será mayor de 1.000 kg (1 t). Cada uno de los tiros de 8 caballos tenía, pues, que tirar con una fuerza de una tonelada para poder contrarrestar la presión del aire exterior.

[5] El "codo de Magdeburgo" mide 550 mm.

[6] Se toma la *superficie del* círculo y *no la de la semiesfera,* porque la presión atmosférica tiene el valor que hemos indicado cuando actúa sobre la superficie formando un ángulo recto con ella. Si la superficie está inclinada la presión es menor. En nuestro caso tomamos la *proyección* rectangular de la superficie esférica sobre el plano, es decir, la superficie del círculo.

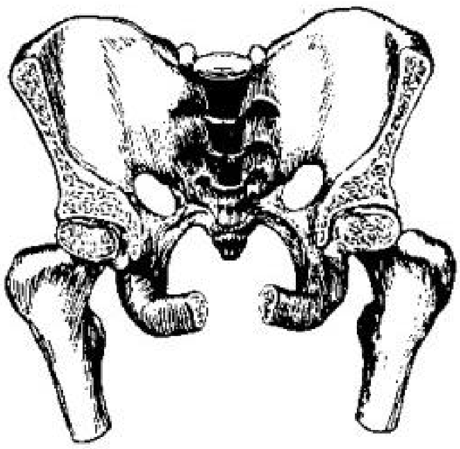

Fig. 62. Los huesos de nuestras articulaciones coxofemorales no se separan debido a la presión atmosférica, que los sujeta lo mismo que a los hemisferios de Magdeburgo.

Parece que para 8 caballos (por cada lado) esto no es mucha carga. Pero no hay que olvidarse de que cuando un caballo tira de un carro cargado con 1 t la fuerza que hace no es de 1 t, sino mucho menor; exactamente la que se necesita para vencer el rozamiento de las ruedas sobre sus ejes y sobre el pavimento. Esta fuerza representa (en una carretera, por ejemplo) el cinco por ciento de la carga, es decir, si el carro pesa una tonelada la fuerza necesaria para arrastrarlo es igual a 50 kg. (Sin hablar ya de que la experiencia demuestra que cuando se enganchan 8 caballos juntos se pierde el 50% del esfuerzo). Por consiguiente, la tracción de 1 t corresponde para los 8 caballos a arrastrar un carro que pese 20 t. Esta es la carga de aire que tenían que arrastrar los caballos del burgomaestre de Magdeburgo. Este esfuerzo se puede comparar con el necesario para mover de su sitio a una locomotora no muy grande, pero que no esté sobre los raíles.

Se ha medido que un caballo fuerte tira de la carga con una fuerza total de 80 kg[7]. Por consiguiente, para separar los hemisferios de Magdeburgo, con tracción uniforme, hubieran sido necesarios 1.000/80=13 caballos por cada lado[8].

[7] A una velocidad de 4 km por hora. Se considera que, por término medio, la fuerza de tracción de un caballo es aproximadamente igual al 15% de su peso. Un caballo ligero pesa 400 kg, uno pesado, 750 kg. Durante poco tiempo (el esfuerzo inicial) la fuerza de tracción puede ser varias veces mayor.

[8] La explicación de por qué hacen falta 13 caballos por *cada* lado puede encontrarse en mi libro *"Mecánica Recreativa"*.

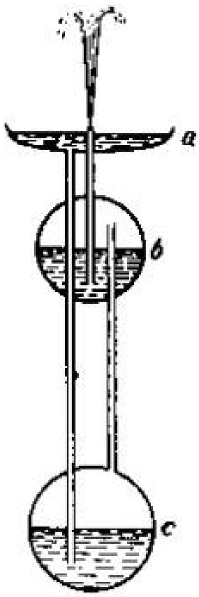

Fig. 63. La fuente de Herón clásica.

El lector quizá se asombre al saber que algunas articulaciones de nuestro esqueleto se mantienen unidas por la misma causa que los hemisferios de Magdeburgo. Nuestra articulación coxofemoral tiene unas propiedades parecidas a los antedichos hemisferios. A esta articulación se le pueden quitar todos los ligamentos musculares y cartilaginosos sin que se desarticule. Ocurre esto porque la presión atmosférica aprieta entre sí los huesos que forman esta articulación, puesto que en el espacio comprendido entre ellos no hay aire.
Volver al inicio

Nuevas Fuentes De Heron
Mis lectores conocerán probablemente la forma ordinaria de la fuente que se atribuye al mecánico de la antigüedad Herón. No obstante, recordaremos aquí su estructura antes de pasar a describir las nuevas variantes de este aparato tan interesante. La fuente de Herón (fig. 63) consta de tres vasijas: una superior, abierta, *a* y dos de forma esférica, *b* y *c*, herméticamente cerradas. Estas vasijas están unidas entre sí por tres tubos dispuestos como se indica en la figura. Cuando en a hay un poco de agua, la esfera b está llena de líquido y la c de aire, la fuente empieza a funcionar. El agua pasa por el tubo de *a* a *c*, hace que el aire pase de esta esfera a la *b* y el agua de *b*, presionada por el aire que entra, sube por el tubo y forma la fuente sobre la vasija *a*. Cuando la esfera *b* se queda vacía, el surtidor deja de echar agua.

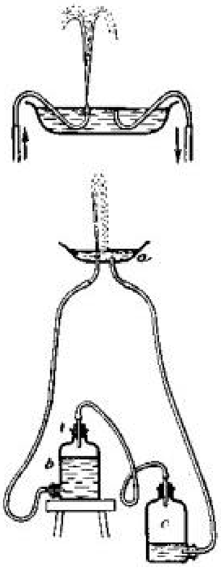

Fig. 64. Modificación actual de la fuente de Herón. Arriba una variante que evita horadar el fondo del plato superior.

Esta es la antiquísima forma de la fuente de Herón. Pero ya en nuestro tiempo, un maestro de escuela italiano, obligado a inventar por la falta de medios de que disponía su gabinete de Física, construyó una fuente de Herón en la que introdujo unas modificaciones que hacen posible que cualquiera pueda construirla valiéndose de medios muy simples (fig. 64). En lugar de las esferas utilizó frascos de farmacia y en vez de ponerle tubos de vidrio o de metal, los puso de goma. La vasija superior no es necesario que tenga agujeros en el fondo; basta introducir en ella los extremos de los tubos como se muestra en el diseño superior de la fig. 64.

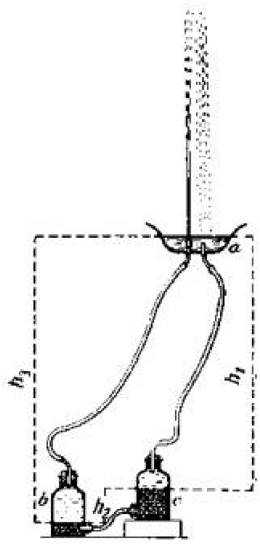

Fig. 65. Fuente que funciona por la presión del mercurio. La altura a que sube el Chorro

es diez veces mayor que la diferencia entre los niveles del mercurio.

El aparato construido de esta forma es mucho más cómodo y fácil de utilizar. Cuando el tarro *b* se queda vacío, porque el agua que había en él pasó ya a través de la vasija *a* al tarro *c*, los tarros *b* y *c* se pueden cambiar de sitio entre sí y la fuente volverá a echar agua, si la boquilla se pone en el otro tubo. Otra ventaja de esta fuente modernizada consiste en que da la posibilidad de variar la situación de las vasijas y, de esta manera, estudiar cómo influye la diferencia de niveles del líquido que hay en ellas en la altura a que se eleva el agua que echa la fuente.

Si se quiere que el chorro llegue mucho más alto, no hay más que sustituir el agua que había en los tarros por mercurio y el aire por agua (fig. 65). El aparato funciona en estas condiciones del modo siguiente: el mercurio pasa del tarro *c* al *b* y hace que de este último salga el agua y origine el surtidor. Sabiendo que el mercurio pesa 13,5 veces más que el agua, podemos calcular a qué altura deberá elevarse el chorro de la fuente. Designemos la diferencia de niveles entre las correspondientes vasijas por h_l, h_2 y h_3. Veamos ahora qué fuerzas son las que hacen que el mercurio de la vasija *c* (fig. 65) pase a la *b*. El mercurio que se halla en el tubo que une entre sí estas vasijas está sujeto a presión por los dos lados. Por la derecha sufre la presión debida a la diferencia de alturas h_2 entre las columnas de mercurio (que es igual a la presión que ejercería una columna de agua 13,5 veces más alta, es decir, 13,5 h_2) más la presión que origina la columna de agua h_l. Por la izquierda presiona sobre él la columna de agua h_3. Por lo tanto, el mercurio es arrastrado con una fuerza total de

$$13{,}5h_2+h_l-h_3$$

Pero $h_3- h_l= h_2$; por esto podemos poner - h_2 en lugar de h_l-h_3 y obtener:

$$13{,}5h_2-h_2$$

es decir, 12,5 h_2. De esta forma, el mercurio entra en la vasija *b* a la presión correspondiente al peso de una columna de agua que tuviera una altura igual a 12,5 h_2. Por esto, teóricamente el chorro de agua puede llegar hasta una altura igual a la diferencia entre los niveles del mercurio en los tarros multiplicada por 12,5. El rozamiento hace que esta altura sea algo menor que la teórica.

A pesar de esto, con el aparato que acabamos de describir se puede conseguir cómodamente que el chorro suba hasta muy alto. Para que llegue a 10 metros de altura basta poner uno de los frascos un metro, aproximadamente, más alto que el otro. Es interesante que, como puede verse, la altura de la vasija *a* con respecto a los tarros en que se encuentra el mercurio no influye en absoluto en la altura a que se eleva el chorro.

Volver al inicio

Vasijas De Pega

En los siglos XVII y XVIII los grandes señores se distraían con juguetes como el siguiente: mandaban a hacer un jarro que en la parte superior tenía unos adornos calados bastante grandes (fig. 66). Este jarro lleno de vino se lo ofrecían a alguien de quien se podían burlar sin temor a las represalias. ¿Cómo beber?

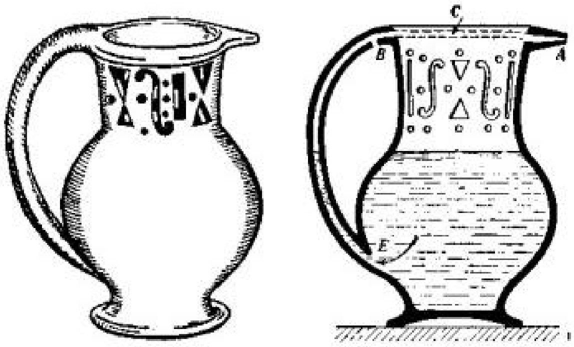

Fig. 66. Vasija de pega de finales del siglo XVIII y corte de la misma en que se ve el canal secreto.

Si empinas el jarro, se derrama el vino por las ranuras caladas sin que ni una gota llegue a la boca. Pasa como en el cuento:

Miel y cerveza bebí
y ni el bigote humedecí.

Pero el que sabía el secreto de estos jarros, que puede verse en la fig. 66 a la derecha, tapaba con un dedo el orificio B, cogía entre los labios el pitorro *A* y chupaba como si fuera de un biberón, sin torcer el jarro. El vino entraba por el agujero E, subía por el canalito que tenía dentro el asa, pasaba después por el borde hueco *c* y salía por el pitorro.
Los alfareros rusos hasta hace poco hacían jarros parecidos a éstos. Yo he tenido ocasión de ver uno en una casa. El secreto estaba muy bien disimulado. El jarro tenía una inscripción que decía: "Bebe pero no te mojes".
Volver al inicio

¿Cuanto Pesa El Agua Que Hay en Un Vaso Boca Abajo?
- Nada, claro está - dirán ustedes -,¿cómo va a pesar sí se derrama?
- ¿Y si no se derrama? - pregunto yo.

En realidad se puede conseguir que el agua no se salga de un vaso boca abajo, es decir, que no se derrame. Este caso es el que se representa en la fig. 67. Como puede verse, una copa de vidrio invertida está sujeta por el pie al platillo de una balanza. La copa está llena de agua, que no se derrama porque los bordes de la copa están sumergidos en el agua que hay en otra vasija. En el otro platillo de la balanza se encuentra otra copa exactamente igual que la primera.

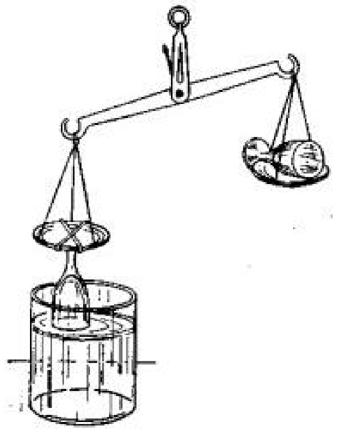

Fig. 67. Procedimiento para pesar el agua que hay en una copa invertida.

¿Hacia qué lado se inclinará la balanza?
Hacia el lado de la copa invertida llena de agua. Esta copa está sometida por arriba a la presión total de la atmósfera, mientras que por abajo el peso del agua que hay en ella debilita esta misma presión atmosférica.

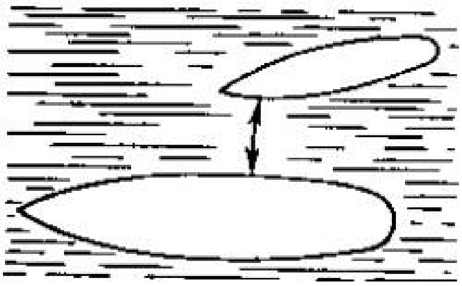

Fig. 68. Posición de los buques "Olympic" y "Hauk" antes del abordaje.

Para restablecer el equilibrio sería necesario llenar de agua la copa del otro platillo.
Por consiguiente, en estas condiciones el agua contenida en un vaso boca abajo pesa lo mismo que la contenida en un vaso en posición normal.
Volver al inicio

¿Por Que Se Atraen Los Barcos?
En otoño del año 1912 ocurrió con el "Olympic", uno de los buques más grandes del mundo en aquella época, el caso siguiente. El "Olympic" navegaba en mar abierto y con rumbo casi paralelo a él y a la distancia de unos cien metros pasaba a gran velocidad otro buque, bastante más pequeño, el crucero acorazado "Hauk". Cuando ambos buques ocupaban la posición que representa la fig. 68, ocurrió algo improvisto. El barco menor torció rápidamente su rumbo y, como si estuviera sometido a una fuerza

invisible, puso proa al "Olympic" sin obedecer al timón, y avanzó hacia él casi directamente. Se produjo un abordaje. La proa del "Hauk" se hundió en el costado del "Olympic". El golpe fue tan fuerte que en la banda del "Olympic" se produjo una gran vía de agua.
Cuando este caso tan singular fue examinado por el tribunal marítimo, este último reconoció culpable al capitán del "Olympic", puesto que, como decía la sentencia, no dio ninguna orden para dejar paso libre al "Hauk", que iba a cruzarse con él.
El tribunal de justicia no vio aquí nada extraordinario. Consideró que se trataba de una simple negligencia del capitán. Sin embargo, el abordaje fue debido a una circunstancia imprevista, fue un caso de *atracción mutua entre dos buques en el mar.*

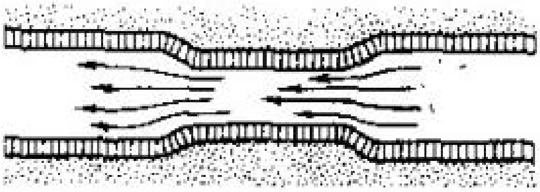

Fig. 69. En las partes estrechas del canal el agua fluye más de prisa y presiona menos sobre las paredes que en las partes anchas.

Estos casos es posible que también ocurrieran antes, cuando los barcos marchaban con rumbos paralelos. Pero hasta que no se empezaron a construir buques gigantes este fenómeno no se puso de manifiesto con tanta fuerza. Cuando las aguas del océano comenzaron a ser surcadas por "ciudades flotantes" el fenómeno de la atracción entre buques se hizo mucho más notorio. Los capitanes de la marina de guerra tienen en cuenta este fenómeno cuando maniobran con su buque.
Multitud de averías ocurridas en barcos pequeños que navegaban cerca de grandes buques de pasajeros o de guerra es posible que fueran producidas por esta misma causa.
¿Cómo se explica esta atracción? En primer lugar, esto nada tiene que ver con la ley de la atracción universal de Newton. En el capítulo IV vimos que esta atracción es demasiado pequeña. La causa de este fenómeno es otra muy distinta y se explica por las leyes del movimiento de los líquidos en tubos y canales. Se puede demostrar que si un líquido se mueve por un canal que tiene unos sitios más anchos y otros más estrechos, por los sitios estrechos el líquido pasa más de prisa y presiona menos sobre las paredes del canal que en los sitios anchos, por los cuales pasa más despacio y presiona más sobre las paredes (éste es el llamado "teorema de Bernoulli".
Esto también es justo para con los gases. Cuando se trata de *gases* este fenómeno se conoce con el nombre de efecto Clément y Desormes (en honor de los físicos que lo descubrieron) y a veces se llama también "paradoja aerodinámica". Este fenómeno fue descubierto casualmente en las siguientes condiciones. En una mina francesa se le ordenó a uno de los obreros que tapara con un escotillón la boca de la galería exterior que servía para suministrar aire comprimido a la mina. El obrero luchó un buen rato con el chorro de aire que entraba en la mina, pero de repente el escotillón mismo cerró de golpe la galería, con tanta fuerza, que si hubiera sido más pequeño habría sido arrastrado por la escotilla de ventilación junto con el obrero. El funcionamiento de los pulverizadores se explica precisamente por esta peculiaridad de las corrientes de los gases. Cuando soplamos por el ramal *a* (fig. 70), que termina en punta, el aire, al llegar al sitio más estrecho, pierde presión. De esta forma, sobre el tubo *b* se

encuentra aire cuya presión es menor que la atmosférica, por lo que esta última hace que el líquido del vaso ascienda por el tubo. Cuando este líquido llega al chorro de aire que sale del tubo *a* es arrastrado por él y se pulveriza.

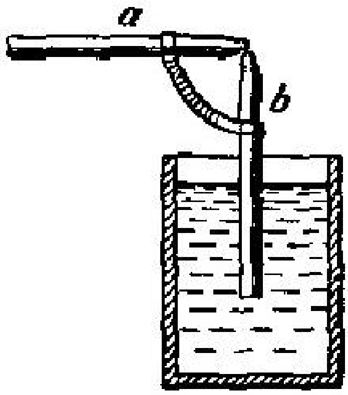

Fig. 70. Esquema del pulverizador

Ahora podemos comprender cuál es la causa de que los barcos se atraigan. Cuando dos buques navegan paralelamente, entre sus costados se forma una especie de canal. En los canales ordinarios las paredes están fijas y se mueve el agua; aquí ocurre al revés, el agua permanece inmóvil, mientras que las paredes se mueven. Pero la acción de las fuerzas no varía por esto. En los sitios más estrechos del canal móvil el agua ejerce menos presión sobre las paredes que en el resto del espacio que rodea a los barcos. En otras palabras, el agua ejerce menos presión sobre los costados afrontados de los barcos que sobre sus partes exteriores. ¿Qué debe ocurrir entonces? Los buques, sometidos a la presión que el agua ejerce sobre sus costados exteriores deberán acercarse entre sí y, naturalmente, el barco menor será el que se desvíe más notoriamente, mientras que el de mayor masa permanecerá casi inmóvil. Por esto la atracción se manifiesta con más fuerza cuando un barco grande pasa rápidamente junto a otro pequeño.

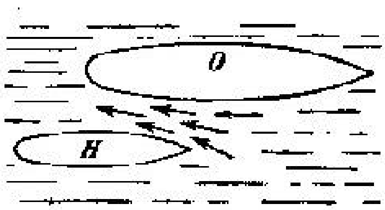

Fig. 71. Corriente de agua entre dos buques que navegan juntos.

Quedamos, pues, en que la atracción de los barcos se debe a la acción absorbente de la corriente de agua. Esta misma causa explica el peligro que encierran para los bañistas los rápidos de los ríos y el efecto absorbente de los remolinos de agua. Se puede calcular que la corriente de agua de un río cuya velocidad sea de 1 m por segundo arrastra al cuerpo de un hombre con una fuerza de ... ¡30 kg! Resistirse a esta fuerza no es cosa fácil, sobre todo en el agua, donde el peso de nuestro cuerpo no nos ayuda a mantener la estabilidad. Finalmente, el arrastre que producen los trenes rápidos sobre los

cuerpos próximos también se explica por el teorema de Bernoulli. Un tren que pase con una velocidad de 50 km por hora arrastrará a las personas que estén cerca con una fuerza de ~ 8 kg.
Los fenómenos relacionados con el teorema de Bernoulli no son raros, pero sí poco conocidos por las personas no especializadas en esta materia. Por esto creemos conveniente detenernos un poco en ellos. A continuación reproducimos un fragmento de un artículo sobre este tema publicado en una revista de divulgación científica por el profesor V. Franklin.
Volver al inicio

Teorema De Bernoulli y Sus Consecuencias
El teorema que por primera vez enunció Daniel Bernoulli en el año 1726, dice: en toda corriente de agua o de aire la presión es grande cuando la velocidad es pequeña y, al contrario, la presión es pequeña cuando la velocidad es grande. Existen algunas limitaciones a este teorema, pero aquí no nos detendremos en ellas.

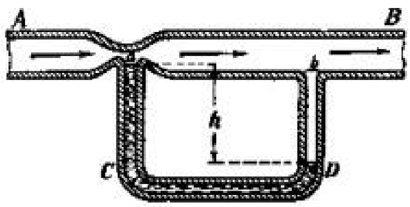

Fig. 72. Ilustración del teorema de Bernoulli. En la parte más estrecha(a) del tubo AB la presión es menor que en la más ancha (b).

Por el tubo *AB* se hace pasar aire. Donde la sección de este tubo es pequeña (como ocurre en *a*), la velocidad del aire es grande, y donde la sección del tubo es grande (como en *b),* la velocidad del aire es pequeña. Si la velocidad es grande, la presión es pequeña, y donde la velocidad es pequeña, la presión es grande. Como la presión del aire en *a* es pequeña, el líquido se eleva por el tubo C; al mismo tiempo, la gran presión del aire en el punto *b* hace que el líquido descienda en el tubo *D*.
La fig. 72 sirve de ilustración a este teorema.
En la fig. 73 el tubo *T* está soldado al disco *DD*; cuando este disco se dispone próximo y paralelo a una lámina *dd*[9] ligera y libre (por ejemplo, un disco de papel) y se sopla por el tubo *T*, el aire pasa entre el disco y la lámina a gran velocidad, pero ésta disminuye rápidamente a medida que se aproxima a sus bordes, puesto que la sección de la corriente de aire aumenta muy de prisa y además porque tiene que salvar la inercia del aire que hay en el espacio entre el disco y la lámina.

[9] Este mismo experimento se puede hacer con un carrete de hilo y un circulito de papel. Para que este último no se desvíe hacia un lado, se traspasa con un alfiler, que después se hace entrar en el agujero del carrete.

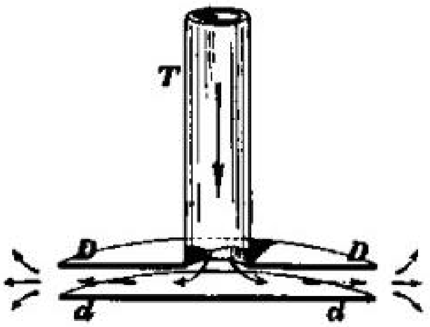

Fig. 73. Experimento con discos

Pero la presión del aire que rodea a la lámina es grande, ya que su velocidad es pequeña, mientras que la presión del aire que hay entre ella y el disco es pequeña, puesto que su velocidad es grande. Por lo tanto, el aire que circunda a la lámina ejerce más influencia sobre ella, tendiendo a aproximarla al disco, que la corriente de aire que pasa entre los dos, que tiende a separarlos; como resultado la lámina *dd* se adhiere al disco *DD* con tanta más fuerza cuanto más intensa sea la corriente de aire que entra por *T*.

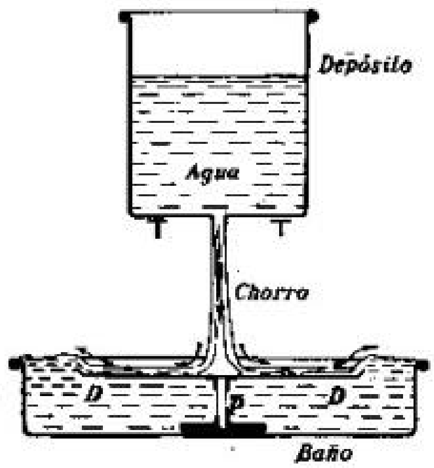

Fig. 74. El disco DD sube por la barra P cuando sobre él se proyecta el chorro de agua del depósito.

La fig. 74 representa un experimento análogo al de la 73, pero con agua. El agua que se mueve rápidamente sobre el disco *DD* tiene un nivel más bajo y se eleva ella misma hasta el nivel más alto del agua tranquila del baño, cuando sobrepasa los bordes del disco. Por esto, el agua tranquila que hay debajo del disco se encuentra a mayor presión que el agua que se mueve sobre él, por consiguiente, el disco se eleva. La varilla *P* impide que el disco se desvíe lateralmente.

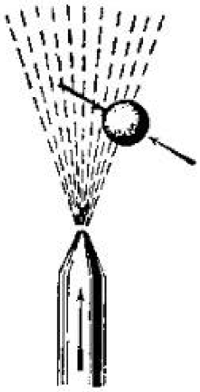

Fig. 75. El chorro de aire no deja que se caiga la pelotita.

En la fig. 75 se representa una pelotita ligera que flota en un chorro de aire. El chorro de aire empuja a la pelotita y al mismo tiempo no deja que se caiga. Cuando la pelotita se sale de la corriente, el aire circundante la hace volver a ella, puesto que la presión de este aire (que tiene poca velocidad) es grande, mientras que la del chorro de aire (cuya velocidad es grande) es pequeña.

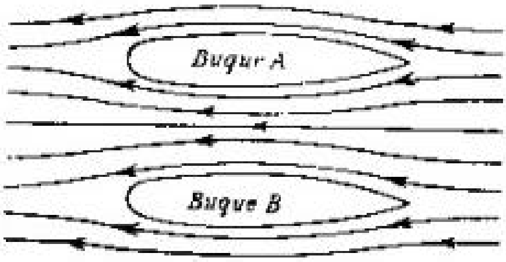

Fig. 76. Dos buques que navegan paralelamente parece que se atraen entre sí.

En la fig. 76 pueden verse dos buques que navegan uno al lado del otro en aguas tranquilas; esto es lo mismo que si los dos barcos estuvieran parados y el agua corriese rodeándolos.

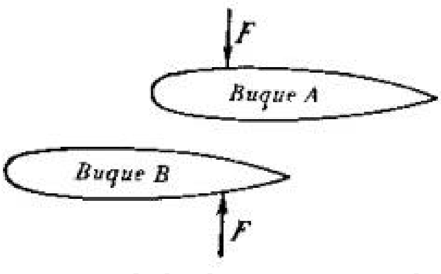

Fig. 77. Cuando los barcos navegan hacia adelante, el B gira y pone proa hacia el A.

Entre los buques se estrecha la corriente y, por lo tanto, la velocidad del agua en este sitio es mayor que por los costados exteriores de ambos buques. Por esto, la presión del agua entre los buques es menor que por los otros dos lados y la presión que ejerce el agua circundante (que es mayor) hace que los barcos se aproximen.

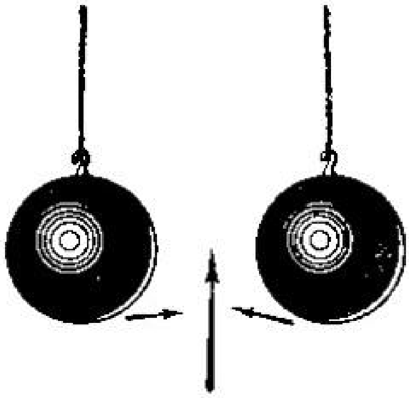

Fig. 78. Si se sopla entre dos esferas ligeras se ve como se aproximan y hasta llegan a juntarse.

Los hombres de mar saben perfectamente que los barcos que navegan juntos se atraen entre sí con bastante fuerza.
El caso en que uno de los buques va detrás del otro, como se representa en la fig. 77, es más peligroso. Las dos fuerzas *F* y *F*, que los aproximan entre sí, tienden a hacerlos girar, con la particularidad de que el buque *B* gira hacia el *A* con gran fuerza. En este caso el choque es casi inevitable, puesto que el timón no tiene tiempo de variar la dirección del movimiento que toma el barco.
El fenómeno a que se refiere la fig. 76 se puede demostrar soplando entre dos pelotitas de goma ligeras, colgadas como se ve en la fig. 78. Cuando el aire pasa entre ellas las pelotitas se aproximan y chocan entre sí.
Volver al inicio

¿Para Que Sirve La Vejiga Natatoria De Los Peces?
Generalmente, y al parecer con toda verosimilitud, se habla e incluso se escribe que la función de la vejiga natatoria de los peces es la siguiente. Cuando el pez quiere subir desde una capa profunda del agua a otra más superficial, hincha su vejiga natatoria; de esta forma el volumen de su cuerpo aumenta, el peso del agua que desaloja se hace mayor que el suyo propio y, de acuerdo con la ley de la flotación, el pez se eleva. Cuando no quiere subir más, o quiere descender, el pez hace lo contrario es decir, comprime su vejiga natatoria. Con esto disminuye su volumen y el peso del agua que desaloja y el pez se va al fondo, de acuerdo con el principio de Arquímedes.
Este concepto tan simple de la función que desempeña la vejiga natatoria de los peces viene desde los tiempos de los sabios de la Academia de Florencia (siglo XVII) y fue expresado por el profesor Borelli en el año 1675. Durante doscientos años esta hipótesis fue admitida sin objeciones y echó raíces en los libros de texto escolares. Pero los trabajos realizados por nuevos investigadores han puesto de manifiesto la falsedad de esta teoría.

Esta vejiga interviene indudablemente en la natación del pez, puesto que los peces privados artificialmente de este órgano pueden mantenerse en el agua únicamente a costa de un intenso trabajo con las aletas. En cuanto dejan de mover las aletas se van al fondo. ¿Cuál es, pues, la función de la vejiga natatoria? El papel que desempeña es muy limitado; ayuda al pez a permanecer a una profundidad determinada, o más concretamente, a la profundidad en que el peso del agua que desaloja su cuerpo es igual al del propio pez. Cuando el pez, moviendo las aletas, baja a una capa *inferior* a este nivel, su cuerpo experimenta una presión exterior mayor por parte del agua y se contrae comprimiendo la vejiga. De esta forma el peso del agua que desaloja disminuye y resulta menor que el del pez y éste desciende. Cuanto mayor es la profundidad a que baja el pez, tanto mayor es la presión que sobre él ejerce el agua (esta presión aumenta en 1 atmósfera cada 10 metros de profundidad), tanto más se comprime el cuerpo del pez y su descenso se hace más rápido.
Lo mismo ocurre, pero en sentido contrario, cuando el pez abandona la capa en que se halla en equilibrio y moviendo sus aletas se eleva a capas superiores. Su cuerpo se libera de una parte de la presión exterior, pero su vejiga, que sigue estando a la misma presión que cuando estaba en equilibrio con la del agua circundante más profunda, hace que se hinche, es decir, que aumente de volumen y, por consiguiente, se eleva. Cuanto más sube el pez, más se hincha su cuerpo y más rápida se hace la ascensión. El pez no puede oponerse a esto "comprimiendo su vejiga natatoria" por la sencilla razón de que las paredes de ésta carecen de fibras musculares que permitan variar su volumen activamente.

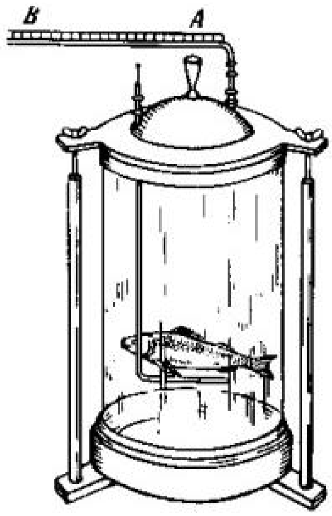

Fig. 79. Experimento con la breca.

El hecho de que el volumen del cuerpo de los peces aumente en realidad de una *forma pasiva* se demuestra con el siguiente experimento (fig. 79). Una breca cloroformada se coloca en una vasija con agua (cerrada) en la que se mantiene una presión semejante a la de la profundidad del agua en que vive el pez en condiciones normales. En la superficie del agua el pez permanecerá inmóvil con el vientre hacia arriba. Si hacemos que se sumerja un poco, volverá a subir a la superficie. Cuando lo sumergimos hasta cerca del fondo, se hunde. Pero entre estos dos niveles existe una capa de agua en la cual el pez permanece en equilibrio y ni se hunde ni sale a flote. Esto se comprende fácilmente si recordamos lo que hemos dicho antes, de que la vejiga natatoria se hincha y se comprime de forma pasiva.

Por lo tanto, a pesar de la idea tan difundida que existe, los peces no pueden voluntariamente hinchar o deshinchar su vejiga natatoria. El volumen de esta vejiga varía pasivamente, es decir, por la acción mayor o menor que sobre ella ejerce la presión exterior (de acuerdo con la ley de Boyle y Mariotte). Estas variaciones de volumen no benefician al pez, al contrario, le perjudican, puesto que hacen que descienda irresistible y aceleradamente hasta el fondo o que ascienda de la misma forma hasta la superficie. En otras palabras, la vejiga solamente sirve para que el pez conserve el equilibrio cuando está inmóvil, pero este equilibrio es *inestable*.

Este es el verdadero papel de la vejiga natatoria cuando se habla de cómo interviene en la natación. Pero la vejiga realiza además otras funciones en el organismo del pez, aunque cuáles son exactamente estas funciones todavía no está claro, ya que este órgano sigue siendo hasta ahora enigmático. Lo único que se puede considerar completamente esclarecido es su papel hidrostático.

Las observaciones de los pescadores confirman lo que hemos dicho. Cuando pescan un pez a gran profundidad y se les escapa dentro del agua al subirlo, en contra de lo que pudiera esperarse el pez sale rápidamente a la superficie, en vez de volverse a la profundidad de donde lo sacaron. A estos peces les suele asomar, la vejiga por la boca.

Volver al inicio

Ondas y Remolinos

Muchos de los fenómenos físicos que vemos a diario no se pueden explicar basándose en las leyes elementales de la Física. Incluso un fenómeno tan corriente como el oleaje del mar en días de viento es inexplicable ateniéndose a los límites del curso escolar de Física.

Fig. 80. Corriente tranquila ("laminar") de un líquido por un tubo.

Pero, ¿por qué cuando un barco corta con su proa el agua tranquila se forman ondas que corren hacia los lados? ¿Por qué ondean las banderas cuando hace viento? ¿Por qué la arena de las playas forma ondas? ¿Por qué forma remolinos el humo que sale de las chimeneas de las fábricas?

Para explicar estos y otros fenómenos semejantes hay que conocer lo que se llama movimiento *turbulento* de los líquidos y de los gases. Aquí procuraremos decir algo de los fenómenos de carácter turbulento y de sus propiedades fundamentales, ya que en los libros de texto de las escuelas apenas si se mencionan.

Supongamos que un líquido corre por un tubo. Si al ocurrir esto todas las partículas del líquido se mueven a lo largo del tubo formando líneas paralelas tenemos el caso más sencillo de movimiento de un líquido, el flujo tranquilo o como dicen los físicos, "laminar". Pero este no es el caso más frecuente. Al contrario, lo ordinario es que el líquido corra por el tubo desordenadamente, que forme remolinos que van de las paredes al eje del tubo. Esto es lo que se llama movimiento *turbulento*. Así es como corre el agua por las tuberías de la red de abastecimiento (pero no por los tubos delgados, donde la corriente es laminar). El movimiento turbulento se produce siempre que la velocidad que lleva un líquido determinado al pasar por un tubo (de diámetro determinado) alcanza cierta magnitud, que se llama velocidad *crítica*[10].

Los remolinos que forma un líquido transparente al correr por un tubo de vidrio se pueden ver echando en aquél un poco de polvo ligero, por ejemplo, polvos de licopodio. Así se ven perfectamente cómo los remolinos van desde las paredes al eje del tubo.

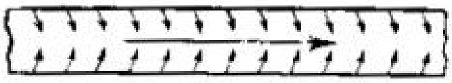

Fig. 81. Corriente "turbulenta" de un líquido por un tubo.

Esta propiedad del movimiento turbulento se aprovecha en la técnica en los frigoríficos y refrigeradores. Cuando un líquido circula con movimiento turbulento por un tubo de paredes refrigeradas, sus partículas entran más pronto en contacto con las paredes frías que si se moviera sin formar remolinos.

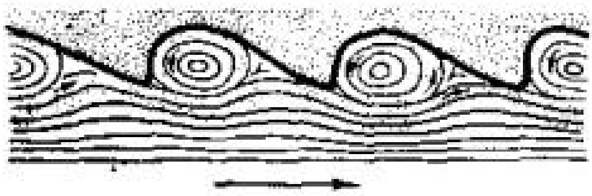

Fig. 82. Formación de las ondas en la arena de la playa por la acción de los remolinos del agua.

No hay que olvidarse de que los líquidos son malos conductores del calor y que si no se remueven se calientan o se enfrían muy despacio. El intenso intercambio calorífico y material que realiza la sangre en los tejidos que baña también es posible gracias a que su circulación por los vasos sanguíneos no tiene carácter laminar, sino turbulento.

Esto que hemos dicho no se refiere solamente a los tubos, sino también a los canales abiertos y a los cauces de los ríos. El agua que corre por los ríos y canales tiene movimiento turbulento. Cuando se mide con precisión la velocidad de la corriente de un río, el instrumento registra pulsaciones, sobre todo cerca del fondo. Estas pulsaciones demuestran que la corriente cambia constantemente de dirección, es decir, que existen remolinos. Las partículas de agua del río no se mueven únicamente a lo largo del cauce, sino también de sus orillas al centro. Por eso no es cierto lo que dicen de que en el fondo de los ríos profundos el agua tiene la misma temperatura (+4°C) durante todo el año. Debido a la remoción que hay en ellos, el agua de los ríos (no de los lagos) tiene una temperatura igual junto al fondo y en la superficie[11].

[10] La velocidad crítica de un líquido cualquiera es directamente proporcional a su viscosidad e inversamente proporcional a su densidad y al diámetro del tubo por que corre

[11] Véase mi libro "¿Sabe usted Física?", § 133.

Los remolinos que se originan en el fondo del río arrastran consigo la arena más ligera y forman en él "ondas" de arena. Esto mismo se puede observar en las orillas del mar bañadas por las olas (fig. 82). Si el agua que corre junto al fondo del río fuera tranquila, la arena presentaría en él una superficie lisa.
De esta forma, junto a la superficie de los cuerpos que baña el agua se forman remolinos. Prueba de la existencia de estos remolinos es, por ejemplo, la forma ondulante que toma una cuerda extendida a lo largo de la corriente (cuando uno de sus extremos está atado y el otro libre). ¿Por qué ocurre esto? Porque el trozo de cuerda junto al cual se forma un torbellino (remolino) es atraído por él; pero un momento después este trozo será movido ya por otro remolino en sentido contrario, esto da lugar a que la cuerda se mueva como una serpiente (fig. 83).

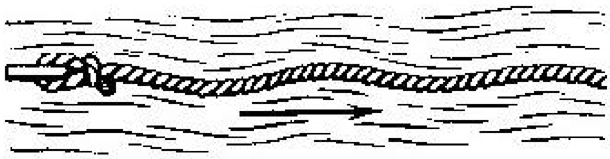

Fig. 83. El movimiento ondulatorio de una cuerda en agua corriente se debe a la formación de remolinos.

Pasemos ahora de los líquidos a los gases, del agua al aire. ¿Quién no ha visto como los remolinos de aire arrastran el polvo que hay en el suelo, la paja, etc.? Esto no es más que una manifestación del movimiento turbulento del aire a lo largo de la superficie de la tierra. Cuando el aire corre a lo largo de una superficie acuática, en los sitios en que se forman remolinos, debido a la depresión que en ellos se produce, se eleva el agua formando una cresta, así se origina el oleaje. Esta misma causa da lugar a las ondas arenosas que vemos en los desiertos y en las faldas de las dunas.
Ahora se comprende por qué ondean las banderas cuando hace viento. Con ellas ocurre lo mismo que con la cuerda en la corriente de agua. Las veletas no señalan constantemente la misma dirección cuando hace viento, sino que, sometidas a la acción de los remolinos, oscilan constantemente. El origen de los remolinos que forma el humo que sale de las chimeneas de las fábricas también es éste. Los gases que suben por la chimenea adquieren un movimiento turbulento que después de salir de ella prosigue durante cierto tiempo por inercia.

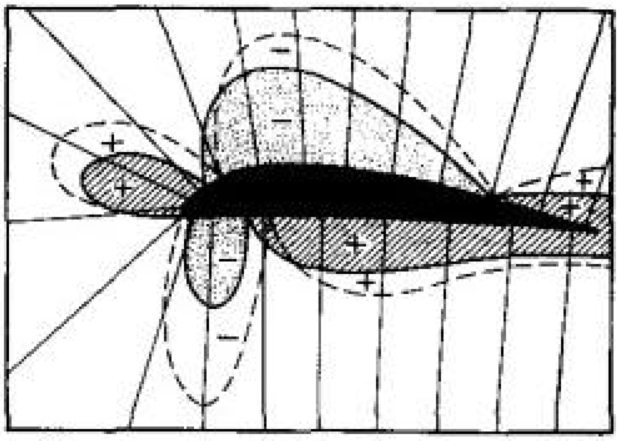

Fig. 84. Fuerzas que actúan sobre el ala de un avión. Distribución

de las presiones (+) y de los enrarecimientos (-) del aire en torno al ala según los experimentos realizados. Como resultado de todas las fuerzas aplicadas, de empuje y de succión, el ala es arrastrada hacia arriba. (Las líneas de contorno de trazo continuo representan la distribución de las presiones; las de trazo punteado representan esto mismo, pero cuando la velocidad de vuelo es mucho mayor.)

El movimiento turbulento del aire tiene gran importancia para la aviación. Las alas de los aviones se hacen de tal forma que debajo de ellas el sitio de enrarecimiento del aire resulta ocupado por el cuerpo de la propia ala, mientras que encima de ella, por el contrario, se intensifica el movimiento turbulento. A consecuencia de esto, el ala sufre por abajo un empuje y por arriba una succión (fig. 84). Fenómenos parecidos tienen lugar cuando los pájaros planean con las alas extendidas.
¿Cómo actúa el viento sobre un tejado sometido a él? Los remolinos crean sobre el tejado un enrarecimiento del aire; el aire que hay debajo del tejado tiende a igualar la presión y al subir le empuja desde abajo. Así ocurre lo que a veces tenemos que lamentar; el viento se lleva algún tejado ligero por estar mal sujeto. Por esta misma razón los vidrios de ventana grandes se cimbran hacia afuera cuando hace viento (y no se rompen por la presión exterior).
Pero estos fenómenos son más fáciles de explicar por el hecho de que cuando el aire se mueve, disminuye la presión (véase "Teorema de Bernoulli").
Cuando una corriente de aire, de temperatura y humedad determinadas, se mueve a lo largo de otra corriente de aire, de temperatura y humedad distintas, se producen remolinos en las dos. La diversidad de formas que presentan las nubes se debe en gran parte a esta causa.
Vemos, pues, que el círculo de los fenómenos relacionados con el movimiento turbulento de los líquidos y los sólidos es muy amplio.
Volver al inicio

Viaje Al Centro De La Tierra
Hasta ahora nadie ha penetrado en la Tierra a una profundidad mayor de 3,3 km. El radio de la Tierra tiene 6.400 km. Hasta el centro de la Tierra queda aún mucho camino que recorrer. Pero la inventiva de Julio Verne hizo penetrar profundamente en las entrañas de la Tierra a dos de sus héroes, el extravagante profesor Lidenbrock y su sobrino Axel. En la novela "Viaje al centro de la Tierra" se describen las extraordinarias aventuras de estos viajeros subterráneos. Entre otras cosas inesperadas con que se encontraron debajo de tierra figura el aumento de la densidad del aire. A medida que aumenta la altura el aire se va enrareciendo con bastante rapidez. Cuando la altura aumenta en progresión aritmética, la densidad disminuye en progresión geométrica. Por el contrario, cuando se desciende más abajo del nivel del mar, el aire sometido a la presión de las capas superiores debe hacerse cada vez más denso. Los viajeros subterráneos tenían que notar esto forzosamente. A continuación reproducimos una conversación entre el tío-científico y su sobrino a 12 leguas (48 km) bajo tierra.

- *¿Qué marca el manómetro? - preguntó el tío.*
- *Una presión muy grande.*

- Ahora comprenderás que bajando poco a poco nos vamos acostumbrando al aire denso y no sentimos molestias.
- ¿Y el dolor de oídos?
- ¡Tonterías!
- Está bien - dije yo, decidido a no contradecir a mi tío -.
El estar rodeado de aire denso resulta incluso agradable. ¿Se ha dado usted cuenta de lo fuerte que se oyen los sonidos?
- Claro. En esta atmósfera hasta los sordos podrían oír. - Pero el aire se irá haciendo cada vez más denso. ¿No alcanzará al fin una densidad como la del agua?
- Naturalmente. Cuando la presión sea de 770 atmósferas.
- ¿Y cuando la profundidad sea mayor?
- La densidad también será mayor.
- ¿Cómo vamos a descender entonces?
- Nos llenaremos los bolsillos de piedras.
- Ah, tío, usted siempre encuentra respuesta.

No volví a meterme en averiguaciones, porque si no podía pensar cualquier otra dificultad que irritaría a mi tío. Sin embargo, me parecía claro que a una presión de varios miles de atmósferas el aire puede pasar al estado sólido. En estas condiciones, aun suponiendo que pudiéramos soportar esta presión, tendríamos que detenernos. Aquí todas las discusiones serían inútiles.

Volver al inicio

La Fantasía y Las Matemáticas

Esto es lo que dice el novelista. Pero si comprobamos los hechos de que se habla en este fragmento resulta otra cosa. Para esto no tendremos que bajar al centro de la Tierra. Para nuestra pequeña excursión por el campo de la Física basta tener un lápiz y una hoja de papel.

En primer lugar procuremos determinar a qué profundidad hay que bajar para que la presión atmosférica aumente en una milésima. La presión atmosférica normal es igual a 760 mm de la columna de mercurio. Si estuviéramos sumergidos no en el aire, sino en mercurio, tendríamos que descender nada más que 760/1000=0,76 mm para que la presión aumentase en una milésima. En el aire tendremos que bajar mucho más: tantas veces más como el mercurio es más pesado que el aire, es decir, 10.500 veces. Por lo tanto, para que la presión aumente en una milésima de la normal tendremos que descender no 0,76 mm, como en el mercurio, sino 0,76 X 10.500 mm, es decir, cerca de 8 m. Cuando bajemos otros 8 m la presión del aire aumentará en otra milésima de la magnitud anterior, y así sucesivamente[12]. Cualquiera que sea él nivel a que nos hallemos, en el "techo del mundo" (22 km), en el pico del Everest (9 km) o junto a la superficie del mar, tendremos que descender 8 m para que la presión del aire aumente en una milésima de su valor inicial. Por consiguiente, obtenemos la siguiente tabla del aumento de la presión del aire al aumentar la profundidad:

0 m (760 mmHg)	= 1 de la normal
8 m	= 1,001 de la normal

[12] En la siguiente capa de 8 m el aire será más denso que en la anterior y, por lo tanto, el incremento de la presión en magnitud absoluta también será mayor que en la capa anterior. Así es efectivamente, puesto que tomamos la milésima parte de una magnitud mayor.

2*8 m es	= $(1,001)^2$ de la normal
3*8 m es	= $(1,001)^3$ de la normal
4*8 m es	= $(1,001)^4$ de la normal

En general, a una profundidad de n*8 m la presión atmosférica será mayor que la normal (1,001)n veces y, mientras la presión no sea demasiado grande, el mismo número de veces aumentará la densidad del aire (por la ley de Mariotte).
Según la novela, en nuestro caso se trata de una profundidad de 48 km bajo tierra, por lo tanto, puede despreciarse la disminución de la gravedad y la del peso del aire que ella determina.
Ahora podemos calcular, aproximadamente, la presión que soportaban los viajeros de Julio Verne a la profundidad de 48 km (48 000 m). En este caso la n de nuestra fórmula será igual a 48.000/8=6.000. Hay, pues, que calcular $1,001^{6.000}$. Como multiplicar 1,001 por sí mismo 6.000 veces resultaría aburridillo y nos llevaría mucho tiempo, recurriremos a los logaritmos que, como dijo Laplace, ahorran trabajo y duplican la vida del que calcula[13].
Tomando logaritmos tenemos que el de la incógnita será igual a

$$6.000 * \lg 1,001 = 6.000 * 0,00043 = 2,6.$$

Por el logaritmo 2,6 hallamos el número buscado. Este número es el 400.
Así tenemos que a 48 km de profundidad la presión atmosférica es 400 veces mayor que la normal. La densidad del aire sometido a esta presión, como demuestran los experimentos realizados, aumenta 315 veces. Por esto parece un poco extraño que nuestros viajeros subterráneos no sintieran más molestias que "dolor en los oídos". Pero en la novela de Julio Verne se habla de que los hombres pueden llegar a profundidades de 120 y hasta de 325 km. La presión del aire sería entonces monstruosa; mientras que la presión máxima que el hombre puede soportar sin perjuicio para su salud es de tres o cuatro atmósferas.
Si por esta misma fórmula quisiéramos calcular a qué profundidad la densidad del aire será igual que la del agua, es decir, 770 veces mayor que la normal, obtendríamos la cifra de 53 km. Pero este resultado es falso, ya que a grandes presiones la densidad del gas no es directamente proporcional a la presión. La ley de Mariotte es justa únicamente cuando las presiones no son excesivamente grandes, es decir, cuando no pasan de centenares de atmósferas. A continuación damos los datos relativos a la densidad del aire obtenidos experimentalmente:

Presión	**Densidad**
200 atmósferas	190
400 atmósferas	315

[13] Aquellos que al terminar la escuela hayan conservado antipatía por las tablas de logaritmos es posible que varíen este sentimiento hacia ellas cuando conozcan cómo las caracterizaba el gran astrónomo francés en su obra "Exposición del sistema del mundo": ."El invento de los logaritmos, al reducir los cálculos de varios meses al trabajo de varios días, es algo que duplica la vida de los astrónomos y los libera del cansancio y de los errores inevitables cuando los cálculos son muy largos. Este descubrimiento es halagüeño para la inteligencia humana, puesto que es totalmente producto de ella. En la técnica el hombre utiliza para aumentar su poder los materiales y las fuerzas que te brinda la naturaleza que lo rodea, pero los logaritmos son el resultado de su propia inteligencia".

600 atmósferas	387
1.500 atmósferas	513
1.800 atmósferas	540
2.100 atmósferas	564

Como puede verse, el aumento de la densidad queda muy retrasado con respecto al incremento de la presión. En vano el sabio de la novela de Julio Verne esperaba poder llegar a una profundidad en que el aire fuera más denso que el agua. Esto no lo hubiera podido conseguir nunca, ya que el aire llega a tener la densidad del agua a la presión de 3.000 atmósferas y después casi no se comprime. En cuanto a solidificar el aire a costa solamente de la presión, sin enfriarlo intensamente (hasta una temperatura menor de – 146°), ni hablar del asunto.

Pero hay que ser justos y reconocer que cuando Julio Verne publicó su novela aún no se conocían los hechos que acabamos de citar. Esto justifica al autor, aunque no corrija la narración.

Antes de terminar, aprovechemos la fórmula que hemos deducido antes para determinar cuál es la profundidad máxima de una mina a la que el hombre pueda descender sin perjuicio para su salud. La presión máxima que puede soportar bien nuestro organismo es de 3 atmósferas. Llamando x a la profundidad de la mina que buscamos, tendremos la ecuación:

$$(1{,}001)^{x/8} = 3,$$

de donde (tomando logaritmos) calculamos x. Obtenemos que x=8,9 kilómetros.

Por lo tanto, el hombre podría encontrarse, sin perjuicio para su salud, a una profundidad de cerca de 9 km. Si el Océano Pacífico se secara, se podría vivir en casi todas las partes de su fondo[14].

Volver al inicio

En Una Mina Profunda

¿Quién ha llegado más cerca del centro de la Tierra? (En realidad, no en las novelas.) Los mineros, naturalmente. Ya sabemos (véase el cap. IV) que la mina más profunda se encuentra en Africa del Sur. Su profundidad es mayor de 3 km. Al decir esto tenemos en cuenta no la penetración de los taladros de perforación de pozos, que han alcanzado hasta 7,5 km, sino las profundidades a que han penetrado los propios hombres. El escritor francés, doctor Luc Durtain que visitó un pozo de la mina Morro Velho, cuya profundidad es de cerca de 2.300 m, escribía:

"Los célebres yacimientos auríferos de Morro Velho se encuentran a 400 km de Río de Janeiro. Después de 16 horas de viaje en tren por sitios montañosos, descendemos a un valle profundo rodeado por la selva. Una compañía inglesa explota aquí filones auríferos a una profundidad a la que antes nunca había descendido el hombre.

El filón va oblicuamente hacia abajo. La mina lo sigue formando seis pisos. Pozos verticales y galerías horizontales. Un hecho que caracteriza extraordinariamente a la sociedad contemporánea es que la mina más profunda que se ha abierto en la corteza terrestre, el intento más intrépido hecho por el hombre para penetrar en las entrañas de la Tierra, es para buscar oro.

[14] Las investigaciones llevadas a cabo durante los últimos años han demostrado que el hombre puede soportar, sin perjuicio para su organismo, presiones mayores de 30 atmósferas. Esto ha permitido sumergirse en el mar, sin escafandra, hasta profundidades mayores de 300 metros.

Póngase la ropa de trabajo de lona y la cazadora de cuero. Tenga cuidado; cualquier piedrecita que caiga por el pozo puede herirle. Nos va a acompañar uno de los "capitanes" de la mina. Entra usted en la primera galería. Está bien iluminada. Un viento helado a 4° le hace temblar; es la ventilación para refrigerar las profundidades de la mina.

Después de descender en una estrecha jaula metálica por el primer pozo hasta una profundidad de 700 m, llega usted a la segunda galería. Baja usted por el segundo pozo. El aire está caliente. Ya está usted más bajo que el nivel del mar.

A partir del pozo siguiente el aire quema la cara. Sudando a chorros y agachado, porque el techo es bajo, avanza usted en dirección al ruido de las máquinas perforadoras. Envueltos en un polvo denso trabajan unos hombres semidesnudos; el sudor chorrea por sus cuerpos; las botellas de agua pasan de mano en mano. No toque usted los trozos de mineral recién desprendidos, están a 57° de temperatura.

¿Y para qué esta realidad tan espantosa y abominable?... Cerca de 10 kilogramos de oro al día ..."

Al describir las condiciones físicas que existían en el fondo de la mina y el grado de explotación a que estaban sometidos los mineros, el autor francés menciona la alta temperatura pero nada dice de que la presión del aire fuera grande. Calculemos cuál será esta presión a 2.300 m de profundidad. Si la temperatura fuera la misma que en la superficie de la tierra, de acuerdo con la fórmula que conocemos, la densidad del aire aumentaría en

$$(1{,}001)^{2.300/8} = 1{,}33 \text{ veces.}$$

Pero en realidad la temperatura no permanece invariable, sino que se eleva. Por esto la densidad del aire no aumenta tanto, sino menos. En definitiva, tenemos que la diferencia entre la presión del aire en el fondo de la mina y en la superficie de la tierra no es más que un poco mayor que la que existe entre la del aire caliente del verano y la del aire frío del invierno. Por esto se comprende que esta circunstancia no llamase la atención del visitante de la mina.

En cambio tiene mucha importancia la notable humedad del aire a estas mismas profundidades, que hace que la permanencia en ellas sea insoportable cuando la temperatura es alta. En una de las minas de Africa del Sur (Johannesburg), de una profundidad de 2.553 m, a 50° de temperatura la humedad llega al 100%; en esta mina se instaló lo que se llama "clima artificial". La acción refrigerante de esta instalación equivale a 2.000 t de hielo.

Volver al inicio

A Las Alturas en Un Estratostato

En los artículos anteriores hemos viajado mentalmente por las entrañas de la Tierra. Nos ha ayudado a realizar estos viajes la fórmula que relaciona la presión del aire con la profundidad. Ahora vamos a tener el valor de remontarnos a las alturas y aplicando esta misma fórmula veremos como varía la presión del aire en ellas. En este caso la fórmula toma el aspecto siguiente:

$$p = 0{,}999^{h/8},$$

donde p es la presión en atmósferas y h es la altura en metros. El número decimal 0,999 ha sustituido al 1,001, porque cuando nos trasladamos hacia arriba 8 m la presión no aumenta en 0,001, sino que *disminuye* en 0,001.

Para empezar resolvamos el problema siguiente: ¿A qué altura hay que elevarse para que la presión del aire se reduzca *a la mitad?*
Para esto haremos p=0,5 en nuestra fórmula y buscaremos la altura h. Tendremos la ecuación:

$$0,5 = 0,999^{h/8},$$

cuya resolución no presenta dificultades para los lectores que sepan manejar los logaritmos. La respuesta h=5,6 km determina la altura a la cual la presión del aire debe reducirse a la mitad.
Sigamos subiendo tras los valerosos aeronautas soviéticos que en los estratostatos "URSS" y "OAX - 1" establecieron en 1933 y 1934 respectivamente los records del mundo de altura, el primero con una marca de 19 km y el segundo con la de 22 km. Estas altas regiones de la atmósfera se hallan ya en la llamada “estratosfera". Por esto, los globos en que se realizaron estas ascensiones no se llaman aeróstatos, sino estratostatos.
Calculemos cuál es la presión atmosférica a esas alturas.
Para la altura de 19 km hallamos que la presión del aire debe ser

$$0,999^{19.000/8} = 0,095 \text{ atm} = 72 \text{ mm}.$$

Para los 22 km de altura

$$0,999^{22.000/8} = 0,066 \text{ atm} = 50 \text{ mm}.$$

Pero si leemos las notas de los "estratonautas" veremos que a las alturas antedichas se indican otras presiones. A 19 km de altura la presión era de 50 mm y a la de 22 km, de 45 mm.
¿Por qué no se cumplen los cálculos? ¿En qué consiste nuestro error?
La ley de Mariotte para los gases es perfectamente aplicable a estas presiones tan bajas. Pero cometimos un error al considerar que la temperatura del aire es igual en todo el espesor de los 20 km, cuando en realidad desciende notablemente al aumentar la altura. Se considera que, por término medio, la temperatura desciende 6,5° por cada kilómetro de elevación. Así ocurre hasta los 11 km de altura, donde es igual a 56° bajo cero. Después, durante un espacio considerable permanece invariable. Si tenemos en cuenta esta circunstancia (para esto no son suficientes los procedimientos de las matemáticas elementales), se obtiene un resultado que concuerda mucho mejor con la realidad. Por esta misma razón, los resultados de los cálculos que antes hicimos, relativos a la presión del aire a grandes profundidades, también deben considerarse solamente como aproximados.
Para terminar debemos decir que el "techo" alcanzado por el hombre ahora es mucho más alto. Muchos aviones fabricados en serie vuelan ya a 25-30 kilómetros de altura. En el año 1961 los aviadores soviéticos establecieron el récord del mundo de altura con una marca de 34,7 km.
Volver al inicio