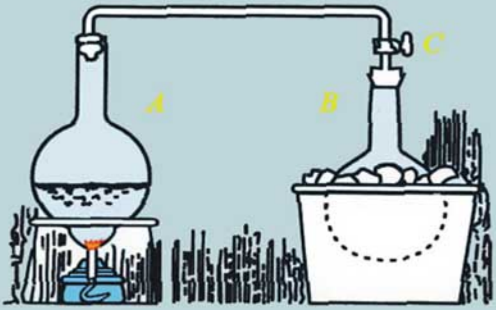
ciencia popular

¿Sabe Usted Física?



Y. Perelman

El presente libro, que casi no rebasa el marco de la física elemental, está destinado a aquellos lectores que han estudiado la física con la escuela secundaria y por lo tanto, consideran que dominan bien sus principios.

Editorial • Mir • Moscú

Y. I. PERELMAN

¿Sabe Usted Física?

Librería Científica

2004

LIBRERÍA CIENTÍFICA, 2004

Jr. Ica 441 – A – Int. 101 ☎ 428-0448

Prefacio del Autor

El presente libro, que casi no rebasa el marco de la física elemental, está destinado a aquellos lectores que han estudiado la física en la escuela secundaria y, por lo tanto, consideran que dominan bien sus principios.

Por la experiencia que he venido acumulando durante muchos años sé que raras veces se encuentran personas que saben al dedillo la física elemental. Las que se interesan por la física en general, son atraídas antes bien por los éxitos más recientes de esta ciencia; además, las revistas de divulgación científica suelen encauzar la atención de los lectores en esta misma dirección. Por otra parte, no se procura llenar las lagunas de la preparación inicial y no se acostumbra profundizar con denuedo en los conocimientos de física elemental, a consecuencia de lo cual éstos, comúnmente, mantienen la forma en que fueron asimilados en la escuela.

Por consiguiente, los elementos de física, así como los cimientos de todas las ciencias naturales y la técnica en general, no son muy seguros. En este caso la fuerza de la rutina es tan grande que ciertos prejuicios "físicos" se notan en la mentalidad de algunos especialistas de dicha rama del saber humano.

A base de la presente obra se podría celebrar un certamen sobre temas de física muy diversos, que tendría por objeto ayudar al lector a determinar en qué grado domina los fundamentos de esta ciencia, sin que pretenda ser un cuestionario para un examen de dicha asignatura; la mayoría de los problemas y preguntas que se ofrecen, difícilmente se plantearían en un examen de física, más aún, el libro contiene cuestiones que no suelen figurar en los exámenes, aunque todas están vinculadas íntimamente al curso de física elemental.

No obstante su sencillez, la mayoría de las preguntas serán inesperadas para el lector; otras le parecerán tan fáciles que tendrá respuestas listas de antemano, las que sin embargo resultarán erróneas.

Por medio de esta colección de preguntas y problemas procuramos convencer al lector de que el contenido de la física elemental es mucho más rico de lo que a veces se imagina; además, demostramos que toda una serie de nociones físicas generalmente conocidas son equivocadas. De esta manera tratamos de incitarle a examinar críticamente sus conocimientos de física con el fin de adecuarlos a la realidad.

El autor

Capítulo Primero

MECÁNICA

1. La medida de longitud más pequeña
2. La medida de longitud más grande
3. Metales ligeros
4. La materia más densa
5. En una isla deshabitada
6. Un modelo de la torre Eiffel
7. Mil atmósferas bajo la punta de un dedo
8. Un esfuerzo de 100.000 at. creado por un insecto
9. El remero en el río
10. El empavesado de un aeróstato
11. Círculos en el agua
12. La ley de inercia y los seres vivos
13. El movimiento y las fuerzas internas
14. El rozamiento como fuerza
15. El rozamiento y el movimiento de los animales
16. Sin rozamiento
17. Tendiendo una cuerda
18. Hemisferios de Magdeburgo
19. La balanza de resorte
20. El movimiento de una lancha
21. El aeróstato
22. Una mosca en un tarro de cristal
23. El péndulo de Maxwell
24. Un nivel de burbuja en un vagón
25. Desviación de la llama de la vela
26. Una varilla doblada
27. Dos balanzas de resorte
28. Una palanca
29. En una plataforma

30. La catenaria
31. Un coche atascado
32. El rozamiento y la lubricación
33. ¿Volando por el aire o deslizando por el hielo?
34. Dados trucados
35. La caída de un cuerpo
36. ¿Cómo hay que lanzar una botella?
37. Un objeto arrojado desde un vagón
38. Tres proyectiles
39. La trayectoria de un cuerpo lanzado
40. La velocidad mínima del obús
41. Saltos al agua
42. Al borde de la mesa
43. En un plano inclinado
44. Dos bolas
45. Dos cilindros
46. Un reloj de arena colocado en una balanza
47. Leyes de mecánica explicadas mediante una caricatura
48. Dos pesas sostenidas mediante una polea
49. El centro de gravedad del cono
50. Una cabina que cae
51. Trocitos de hojas de té en el agua
52. En un columpio
53. La atracción entre los objetos terrestres y los cuerpos celestes
54. La dirección de la plomada

1. La medida de longitud más pequeña

Cite la medida de longitud más pequeña.

Una milésima de milímetro –micrómetro (µm), micra o micrón (µ)– no es la unidad de longitud más pequeña de las que se utilizan en la ciencia moderna[1]. Hay otras, todavía más pequeñas, por ejemplo, las unidades submúltiplos de milímetro: el nanómetro (nm) que equivale a una millonésima de milímetro, y el llamado Angstrom (Å) equivalente a una diezmillonésima de milímetro. Las medidas de longitud tan diminutas sirven para medir la magnitud de las ondas luminosas. Además, en la naturaleza existen cuerpos para cuyas dimensiones tales unidades resultan ser demasiado grandes. Así son el electrón[2] y el protón cuyo diámetro, posiblemente, es mil veces menor aún.

2. La medida de longitud más grande

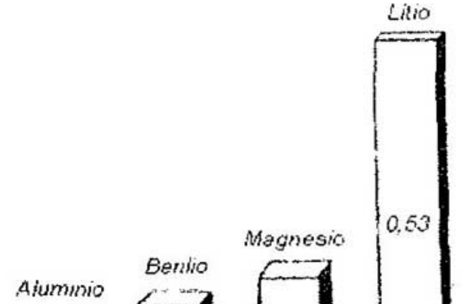
¿Cuál es la medida de longitud más grande?

Hasta hace cierto tiempo, la unidad de longitud más grande utilizada en la ciencia se consideraba el año luz, equivalente al espacio recorrido por la luz en el vacío durante un año. Esta unidad de distancia representa 9,5 billones de kilómetros ($9{,}5 \times 10^{12}$ km). En los tratados científicos más a menudo se suele emplear otra, que la supera más de tres veces, llamada parsec (pc). Un pársec (voz formada de par, abreviación de paralaje, y sec, del lat. secundus, segundo) vale 31 billones de kilómetros (31×10^{12} km.). A su vez, esta gigantesca unidad de distancias astronómicas resulta ser demasiado pequeña. Los astrónomos tienen que utilizar el kiloparsec que equivale a 1000 pc, y el megaparsec, de 1.000.000 pc, que hoy en día es la unidad de medida más grande. Los megaparsec se utilizan para medir las distancias hasta las nebulosas espirales.

3. Metales ligeros. Metales más ligeros que el agua

¿Existen metales más ligeros que el agua? Cite el metal más ligero.

Cuando se pide nombrar un metal ligero, se suele citar el aluminio; no obstante, éste no ocupa el primer lugar entre sus "semejantes": hay otros, mucho más ligeros que él.



Prismas de peso igual fabricados de metales ligeros.

Para comparar, en la figura se ofrecen prismas de masas iguales, hechos de diferentes metales ligeros. A continuación los citamos especificando su densidad (g/cm^3):

Aluminio	2,7
Berilio	1,9
Magnesio	1,7
Sodio	0,97
Potasio	0,86
Litio	0,53

Según vemos, el litio es el metal más ligero cuyo peso específico es menor que el de muchas especies de madera (los tres últimos metales son más ligeros que el agua); un trozo de litio flota en el queroseno sólo sumergiéndose hasta la mitad. El litio pesa 48 veces menos que el metal más pesado, el osmio.

Entre las alcaciones empleadas en la industria moderna, las más livianas son:

1) El duraluminio (aleación de aluminio con pequeñas cantidades de cobre y magnesio); tiene una densidad de 2,6 g/cm^3 y pesa tres veces menos que el hierro, superándolo en resistencia una vez y media.
2) El electrón (no se confunda con la partícula elemental de carga negativa); este metal tiene una resistencia casi igual que el duraluminio y es más liviano que éste en el 30 % (su densidad es de 1,84 g/cm^3).

4. La sustancia más densa

¿Qué densidad tiene la sustancia más densa que se conoce?

La densidad del osmio, iridio y platino (elementos considerados como los más densos) nada vale en comparación con la de algunos astros. Por ejemplo, un centímetro cúbico de materia de la estrella de Van Maanen, perteneciente a la constelación zodiacal de Piscis, contiene 400 kg. de masa por término medio; esta materia es 400.000 veces más densa que el agua, y unas 20.000 veces más densa que el platino. Un diminuto perdigón hecho de semejante materia, de unos 1,25 mm. de diámetro, pesaría 400 g.

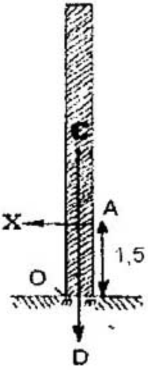
5. En una isla deshabitada

He aquí una de las preguntas presentadas en el famoso certamen de Edison[3]. *"Encontrándose en una de las islas de la zona tropical del Pacífico, ¿cómo se podría desplazar, sin emplear instrumento alguno, una carga de tres toneladas, digamos, un peñasco de 100 pies de largo y de 15 pies de alto?"*

"¿Hay árboles en aquella isla tropical?", pregunta el autor de un libro publicado en alemán y dedicado al análisis del certamen organizado por Edison. Ésta es una pregunta superflua, pues para mover un peñasco no se necesitan árboles: se puede realizar esta operación sólo con las manos. Calculemos las dimensiones del peñasco, que no se mencionan en el problema (cosa que no puede menos que provocar sospechas) y todo estará claro. Si pesa 30.000 N, mientras que la densidad del granito es de 3.000 kg/cm^3, su volumen valdrá 1 m^3. Como la peña apenas mide 30 m. de largo y unos 5 m. de alto, su grosor será de

$$1 / (30 \times 5) = 0,007 \text{ m.}$$

es decir, de 7 mm. Por consiguiente, se tenía en cuenta una pared delgada de 7 mm. de grosor. Para tumbar semejante obstáculo (siempre que no esté muy hundido en el terreno) sería suficiente empujarlo con las manos o el hombro. Calculemos la fuerza que se necesita para ello.



Desplome del peñasco de Edison.

Designémosla por X; en la figura la representa el vector AX. Dicha fuerza está aplicada al punto A dispuesto a la altura de los hombros de una persona (1,5 m.), y tiende a hacer girar la pared en torno al eje O. Su momento es igual a

$$Mom.\ X = 1{,}5X$$

El peso de la peña P = 30.000 N, aplicado a su centro de masas C, se opone al esfuerzo de empuje y tiende a mantener el equilibrio. El momento creado por el peso respecto del eje D es igual a

$$Mom.\ P = Pm = 30.000 \times 0,0035 = 105.$$

En este caso la fuerza X se determina haciendo uso de la ecuación siguiente:

$$1,5\,X = 105$$

de donde

$$X = 70\ N$$

o sea, empujando la pared con un esfuerzo de 70 N, una persona podría tumbarla.

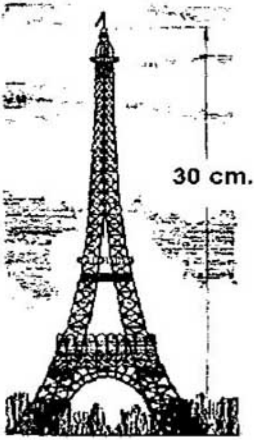
Es muy poco probable que semejante obra de mampostería pudiera permanecer en posición vertical: la desplomaría un leve soplo de aire. Es fácil calcular mediante el método recién descrito que para tumbar esa pared bastaría un viento (que interviene como una fuerza aplicada al punto medio de la obra) de sólo 15 N, mientras que un viento no muy fuerte, creando una presión de 10 N/m², ejercería sobre ella un empuje superior a los 10.000 N.

6. Modelo de la torre Eiffel

La torre Eiffel, toda de hierro, mide 300 m. (1000 pies) de altura y pesa 9000 t. ¿Cuánto pesará su modelo exacto, también hecho de hierro, de 30 cm. (1 pie) de altura?

Este problema es más bien geométrico que físico; no obstante, ofrece mayor interés para la física, pues en física a veces se suelen comparar las masas de cuerpos geométricamente semejantes. Se requiere determinar la razón de masas de dos cuerpos semejantes, además, las dimensiones lineales de uno de ellos son 1000 veces menores que las del otro. Sería un error craso creer que un modelo de la torre Eiffel, disminuido tantas veces, tenga una masa de 9 t. en vez de 9000 t., es decir, que sea mil veces menor que su prototipo. En realidad, los volúmenes y, por tanto, las masas de los cuerpos geométricamente semejantes se relacionan como sus dimensiones lineales a la tercera potencia. Luego tal modelo debería tener una masa 1000^3 veces menor que la obra real, es decir, sería 1.000.000.000 veces menor:

9.000.000.000 / 1.000.000.000 = 9 g.



¿Cuánto pesará semejante modelo de la torre Eiffel?

Ésta sería una masa insignificante para un artefacto de hierro de 30 cm. de altura. Pero no debemos sorprendernos de ello, pues sus barras serían mil veces más delgadas que las de la original, es decir, semejarían hilos, y todo el modelo parecería tejido de un alambre finísimo[4], de modo que no hay motivo para extrañarnos de su masa tan pequeña.

7. Mil atmósferas bajo la punta de un dedo

¿Podría Ud. ejercer una presión de 1000 at. con un dedo?

A muchos lectores les sorprenderá la afirmación de que al manejar una aguja o un alfiler, se ejerce una presión de 1000 at. Es muy fácil cerciorarnos de esto midiendo el esfuerzo que se aplica a un alfiler puesto verticalmente en el plato de una balanza y presionado con un dedo; esta magnitud será de unos 3 N. El diámetro del área que sufre la presión ejercida por la punta del alfiler, es de 0,1 mm., ó 0,01 cm., aproximadamente; ésta es igual a

$$3 \times 0{,}01^2 = 0{,}0003 \text{ cm}^2.$$

Por lo tanto, la presión correspondiente a 1 cm^2 será de

$$3 / 0{,}0003 = 10.000 \text{ N}.$$

Como una atmósfera técnica (at.) equivale a una presión de 10 N por 1 cm^2, al introducir el alfiler, ejercemos una presión de 1000 at. La presión de trabajo que el vapor crea en el cilindro de la máquina de vapor es cien veces menor.

Un sastre, manejando una aguja, a cada rato se vale de una presión de cientos de atmósferas sin sospechar que sus dedos son capaces de desarrollar una presión tan enorme. Tampoco se da cuenta de esto un barbero que hace la barba a su cliente con una navaja de afeitar. Si bien ésta ataca el pelo con una fuerza de unas cuantas décimas de N, el grosor de su filo no supera 0,0001 cm., mientras que el diámetro de un pelo es menos de 0,01 cm.; en este caso la presión ejercida por la navaja afecta un área de

$$0{,}0001 \times 0{,}01 = 0{,}000001 \text{ cm}^2$$

La presión específica que una fuerza de 0,01 N ejerce sobre un área tan pequeña es de

$$0{,}01 : 0{,}000001 = 10.000 \text{ N/cm}^2$$

o sea, es de 1000 at. La mano comunica a la navaja una fuerza superior a 0,01 N, por lo cual la presión de esta última sobre el pelo alcanza decenas de miles de atmósferas.

8. Un esfuerzo de 100.000 at. creado por un insecto

¿Podría un insecto crear una presión de 100.000 at.?

Los insectos tienen una fuerza tan insignificante en valor absoluto que parece extraña la afirmación de que algunos de ellos puedan ejercer una presión de 100.000 at. No obstante ello, se conocen insectos capaces de crear una presión mucho mayor. Por ejemplo, la avispa ataca a su presa clavando en ella su aguijón con una fuerza de tan sólo 10 – 14 N, o algo así. Pero el dardo de este hemínóptero es tan agudo que ni siquiera la técnica moderna, por más sofisticada que sea, puede crear un efecto semejante; aun los instrumentos microquirúrgicos son mucho más romos (adj. Obtuso y sin punta) que el aguijón de la avispa. Su punta es tan afilada que ni el microscopio más potente puede descubrir una "meseta" en ella.

La punta de una aguja vista en un microscopio de gran aumento, semejaría la cima de una montaña.

La punta de la aguja, vista en semejante microscopio, en cambio, parecería la cima de una montaña (arriba), mientras que el filo de un cuchillo muy afilado semejaría más bien una sierra (abajo).

El filo de un cuchillo visto en un microscopio de gran aumento semejaría una sierra.

Al parecer, el dardo de la avispa es el "instrumento" natural más agudo: su radio de redondeo no supera 0,00001 mm., en tanto que el filo de una navaja de afeitar muy bien aguzada es no menos de 0,0001 mm. y alcanza 0,001 mm. Calculemos el área afectada por la fuerza de la presión de 0,0001 N cuando la avispa clava su aguijón, o sea, un área de 0,000001 mm. de radio. Adoptando, para simplificar, $\pi = 3$, obtendremos el siguiente resultado:

$$3 \times 0{,}000001^2 \text{ cm}^2 = 0{,}000000000003 \text{ cm}^2$$

La fuerza que actúa sobre esta área es de 0,0001 N, de modo que se crea una presión de

$$0{,}0001 / 0{,}000000000003 = 330.000 \text{ at} = 3{,}3 \cdot 10^{10} \text{ Pa.}$$

Ejerciendo una presión tan enorme una avispa podría punzar el blindaje de acero más resistente si su dardo fuera lo suficientemente tenaz.

9. El remero en el río

Una embarcación de remo navega por un río, y junto a ella flota una astilla. ¿Qué le es más fácil al remero, adelantar 10 m. a la astilla o quedar a su zaga a la misma distancia?

Aun las personas que practican el deporte del remo, a menudo suelen responder erróneamente a la pregunta planteada: les parece que remar aguas arriba es más difícil que aguas abajo; por consiguiente, en su opinión cuesta menos trabajo aventajar a la astilla que quedar a su zaga. Por supuesto, es más difícil bogar corriente arriba que corriente abajo. Mas, si se quiere alcanzar un punto que se desplaza con la misma velocidad, por ejemplo, la mencionada astilla, la situación se torna distinta. Hay que tener en cuenta el hecho de que la lancha que flota a favor de la corriente se encuentra en reposo respecto del agua que la lleva. De modo que el remero maneja los remos del mismo modo que en el agua de un estanque. En éste da igual bogar en cualquier dirección; lo mismo ocurre en nuestro caso, encontrándose en medio de agua corriente. De manera que el remero tendrá que invertir igual cantidad de trabajo, sin que importe qué es lo que pretende, aventajar a la astilla llevada por la corriente o rezagarse de ella a la misma distancia.

10. El empavesado de un aeróstato

Un aeróstato es arrastrado por el viento en dirección norte. ¿En qué sentido se alinea el empavesado de la barquilla?

Mientras el aeróstato se desplaza a favor del flujo de aire, ambos tienen la misma velocidad: el globo y el aire ambiente están en reposo uno respecto a otro. Por esta razón, el empavesado deberá colgar de la barquilla, como sucede en tiempo de calma. Los tripulantes no deberán sentir ni el menor soplo de aire, aunque sean llevados por un huracán.

11. Círculos en el agua

Al arrojar una piedra al agua estancada se forman ondas que se propagan en torno al punto de caída.

¿Qué forma tienen las ondas que surgen cuando una piedra cae al agua corriente?

Si usted no encuentra la manera adecuada de abordar este problema quedará despistado y sacará la conclusión equivocada de que, en el agua corriente, las ondas deben alargarse en forma de elipse o de óvalo, y estar achatadas en la parte que enfrenta a la corriente. Sin embargo, observando atentamente las ondas que viajan en torno al punto de caída de una piedra en un río, nos daremos cuenta de que tienen forma circular, por muy rápida que sea la corriente.

¿Qué forma tienen las ondas formadas al arrojar una piedra al agua corriente?

En esto no hay nada de extraño; analizando detenidamente el fenómeno descrito concluiremos que las ondas que surgen alrededor del punto donde cae la piedra, deben tener forma circular tanto en el agua corriente como estancada. Vamos a examinar el movimiento de las partículas de agua agitada como resultado de dos movimientos: uno radial (desde el centro de oscilaciones) y otro de traslación (según la corriente del río). Un cuerpo que participa en varios movimientos se traslada, en resumidas cuentas, hacia el punto donde se encontraría si realizara sucesivamente dichos movimientos.

Por tanto, supongamos primeramente que la piedra ha sido arrojada en un agua quieta. En este caso está claro que las ondas que surgen son circulares.

Ahora supongamos que el agua está en movimiento, sin prestar atención a la velocidad y al carácter uniforme o variado de dicho movimiento, siempre que sea progresivo. ¿Qué pasará con las ondas circulares? Se trasladarán paralelamente una respecto a otra, sin sufrir deformación alguna, es decir, seguirán siendo circulares.

12. La ley de inercia y los seres vivos

¿Obedecerán los seres vivos a la ley de inercia?

El motivo por el cual se pone en duda la afirmación de que los seres vivos obedezcan a la ley de inercia es el siguiente. Se suele considerar que ellos pueden ponerse en movimiento sin que intervenga una fuerza externa, mientras que la ley de inercia reza:

"Un cuerpo abandonado a la suerte permanecerá en estado de reposo o continuará su movimiento rectilíneo y uniforme hasta que una fuerza externa cambie este estado" (Prof. A. Eijenvald, Física teórica).

No obstante, la palabra "externa" no es indispensable en el enunciado de la ley de inercia, ni mucho menos: en este caso es un vocablo de más. Isaac Newton no lo utiliza en sus Principios matemáticos de la filosofía natural, es decir, de la física.

He aquí una versión literal de la definición newtoniana de dicha ley:

"Todo cuerpo continuará en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo mientras y por cuanto no necesite cambiar este estado debido a las fuerzas aplicadas a él".

Según vemos, Isaac Newton no indica que la fuerza que hace que el cuerpo abandone el estado de reposo o deje de moverse por inercia, obligatoriamente tiene que ser externa.

Semejante enunciado de la ley de inercia no permite dudar de que ella afecta a todos los seres vivos.

Por lo que atañe a la facultad de moverse sin la participación de fuerzas externas, razonamientos relativos a esta cuestión aparecen en los ejercicios siguientes.

13. El movimiento y las fuerzas internas

¿Podrá poner se en movimiento un cuerpo sólo a expensas de sus fuerzas internas?

Se considera que un cuerpo es incapaz de ponerse en movimiento únicamente a expensas de sus fuerzas internas. Éste es un prejuicio. Basta con citar el ejemplo del misil que sólo se mueve merced a sus fuerzas internas.

Lo cierto es que estas últimas no pueden provocar un movimiento igual de toda la masa del cuerpo. Pero ellas son capaces, por ejemplo, de imprimir un movimiento a una parte de éste hacia adelante, y a la otra, otro movimiento hacia atrás. Así sucede en el caso del misil.

14. El rozamiento como fuerza

¿Por qué se suele decir que el rozamiento es una fuerza, a pesar de que el mismo, de por si, no puede contribuir al movimiento (por tener siempre sentido contrario a éste)?

Desde luego, el rozamiento no puede ser causa directa de movimiento; por el contrario, lo impide. Precisamente por eso lo llaman con todo fundamento fuerza. ¿Qué es una fuerza? Isaac Newton la define del modo siguiente: "La fuerza es una acción ejercida sobre un cuerpo a fin de modificar su estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme".

El rozamiento modifica el movimiento rectilíneo de los cuerpos, convirtiéndolo en uno variado (retardado). Por consiguiente, el rozamiento es una fuerza. Para diferenciar tales fuerzas no motrices, como el rozamiento, de otras, capaces de provocar movimiento, las primeras se dice que son pasivas, y las segundas, activas. El rozamiento es una fuerza pasiva.

15. El rozamiento y el movimiento de los animales

¿Qué papel desempeña el rozamiento en el proceso de movimiento de los seres vivos?

Examinemos un ejemplo concreto, a saber, la marcha de la persona. Se suele creer que durante la marcha la fuerza motriz es el rozamiento, la única fuerza externa que de hecho interviene en este proceso. En algunos libros de divulgación científica aun se encuentra semejante criterio que, lejos de esclarecer el asunto, lo embrolla más. ¿Sería capaz el rozamiento provocar movimiento si no puede sino retardarlo?

En lo que se refiere al papel que el rozamiento desempeña en el andar de los hombres y los animales, se debe tener en cuenta lo siguiente. Al caminar, deberá ocurrir lo mismo que durante el movimiento de un ingenio: el hombre puede mover un pie hacia adelante sólo a condición de que el resto de su cuerpo retroceda un poco. Este efecto se observa muy bien cuando se camina por un terreno resbaladizo. Mas, de haber un rozamiento suficientemente considerable, el cuerpo no retrocede, y su centro de masas se desplaza hacia adelante: de esa manera se da un paso.

Pero, ¿merced a qué fuerza el centro de masas del cuerpo humano se desplaza hacia adelante?

Esta fuerza se debe a la contracción de los músculos, es decir, es una fuerza interna. En tal caso la función del rozamiento consiste únicamente en equilibrar una de las dos fuerzas internas iguales que surgen durante la marcha, dando, de esa manera, prioridad a la otra.

Durante el desplazamiento de los seres vivos, así como durante el movimiento de una locomotora, la función del rozamiento es idéntica. Todos estos cuerpos realizan movimiento progresivo no gracias a la acción del rozamiento, sino merced a una de las dos fuerzas internas que prevalece a expensas de él.

16. Sin rozamiento

Imagínese que una persona se encuentra en una superficie horizontal perfectamente lisa. ¿De qué manera podría desplazarse por ella?

Si no existiera rozamiento, sería imposible caminar; éste es uno de los inconvenientes de semejante situación. No obstante, sería posible desplazarse por una superficie perfectamente lisa.

Para ello habría que arrojar algún objeto en dirección opuesta a la que la persona quisiera seguir; entonces, conforme a la ley de reacción, su cuerpo avanzaría en la dirección elegida. Si no hay nada que arrojar, tendría que quitarse alguna prenda de vestir y lanzarla.

Obrando de la misma manera la persona podría detener el movimiento de su cuerpo si no tiene de qué agarrarse.

En semejante situación se ve un cosmonauta que sale al espacio extravehicular. Permaneciendo fuera de la nave, seguirá su trayecto por inercia. Para acercarse a ella o alejarse a cierta distancia, podrá utilizar una pistola: la repercusión que se produce durante el disparo le obligará a desplazarse en sentido opuesto; la misma arma le ayudará a detenerse.

17. Tendiendo una cuerda

El problema siguiente fue tomado del libro de texto de mecánica de A. Tsinguer. Helo aquí. "Para romper una cuerda una persona tira de sus extremos en sentidos diferentes, aplicando a cada uno de ellos una fuerza de 100 N. Como no puede romperla obrando de esta manera, sujeta uno de los extremos tirando del otro con las dos manos con una fuerza de 200 N. ¿Estará más tensa la cuerda en el segundo caso?"

Podría parecer que el tensado de la cuerda será igual no obstante la magnitud de la fuerza que se aplique: de 100 N a cada extremo, o de 200 N a uno de ellos, sujetando el otro. En el primer caso, las dos fuerzas, de 100 N cada una, aplicadas a los cabos de la cuerda, engendran un esfuerzo extensor de 200N; en el segundo, la misma tensión se crea con la fuerza de 200 N aplicada al extremo libre.

Éste es un error garrafal. En ambos casos la soga se tensa de manera distinta. En el primero sufre la acción de dos fuerzas, de 100 N cada una, aplicadas a dos extremos, en tanto que en el segundo es extendida por dos fuerzas, de 200 N cada una, aplicadas a dichos extremos, puesto que la fuerza de las manos origina una reacción de valor igual por parte del punto de fijación del elemento. Por consiguiente, en el segundo caso la estira un esfuerzo dos veces mayor que en el primero.

Es muy fácil incurrir en un nuevo error al determinar la magnitud de tensión de la cuerda. Cortémosla sujetando los extremos libres a una balanza de resorte, uno al anillo y el otro, al gancho. ¿Qué indicará este utensilio?

No se debe creer que en el primer caso el fiel marcará 200 N, y en el segundo, 400 N. Es que dos fuerzas contrarias, de 100 N cada una, que solicitan sendos extremos de la soga, crean un esfuerzo de 100 N en vez de 200 N. Un par de fuerzas, de 100 N cada una, que halan la soga en sentidos diferentes, no son sino lo que debería llamarse "fuerza de 100 N". No existen otras fuerzas de 100 N: toda fuerza tiene dos "extremos". Aunque a veces se cree que se trata de una sola fuerza, y no de un par de fuerzas, esto se debe a que su otro "extremo" se localiza muy lejos y por eso "no se ve". Al caer, todo cuerpo experimenta la acción de la fuerza de atracción terrestre; ésta es uno de los "extremos" de la fuerza que interviene en este caso, mientras que el otro, es decir, la atracción de la Tierra por el cuerpo que cae, permanece en el centro del Globo.

Conque, una cuerda estirada por dos fuerzas contrarias, de 100 N cada una, sufre un esfuerzo de 100 N; mas, cuando se aplica una fuerza de 200 N (en el sentido opuesto se crea el mismo esfuerzo de reacción), el esfuerzo tensor es igual a 200 N.

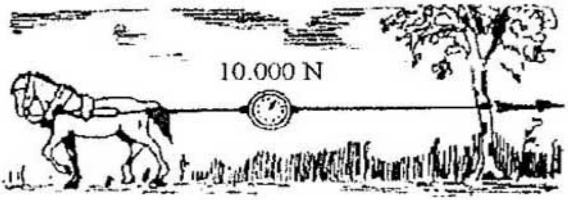
18. Hemisferios de Magdeburgo

Para realizar su famosa experiencia con los "hemisferios de Magdeburgo" Otto von Guericke unció ocho caballos a cada lado, que tenían que tirar de las semiesferas de metal huecas para separarlas.

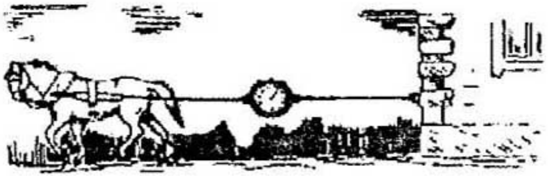
¿Sería mejor sujetar uno de los hemisferios a un muro halando el otro con los dieciséis caballos?

¿Se podría crear un esfuerzo mayor en este caso?

Según la explicación del problema antecedente, en la experiencia de dos hemisferios de Otto von Guericke ocho caballos sobraban.



El dinamómetro indica la fuerza de tracción del caballo o del árbol, y no la suma de ambos esfuerzos.



En este caso la reacción del muro, juega el papel de tracción del tronco del árbol.

Podrían sustituirse por la resistencia de un muro o del tronco de un árbol suficientemente fuerte.

Con arreglo a la ley de acción y reacción, la fuerza de reacción creada por el muro equivaldría a la de tracción de ocho caballos. Para aumentar el esfuerzo de tracción, habría que ponerlos a tirar en el mismo sentido que los demás. (No se debe creer que en este caso la fuerza de tracción aumentaría al doble: como los esfuerzos no coordinan del todo, la doble cantidad de caballos no provoca una doble tracción, sino menos, aunque su fuerza es mayor que la ordinaria.)

19. La balanza de resorte

Una persona adulta es capaz de estirar el resorte de una balanza de resorte aplicando un esfuerzo de 100 N, y un niño, de 30 N. Qué magnitud indicará el instrumento si ambos estiran el resorte simultáneamente en sentidos contrarios?

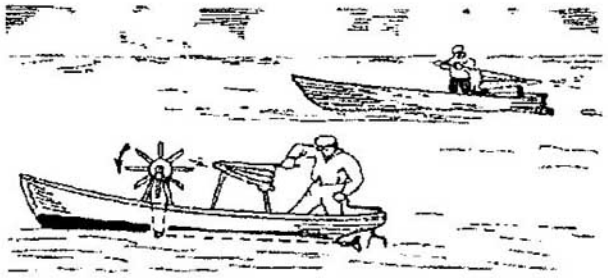
Sería un error afirmar que el fiel de la balanza de resorte debe indicar 130 N, pues el adulto tira del anillo con una fuerza de 100 N, mientras que el niño hala el gancho con uno de 30 N.

Esto no es cierto, pues es imposible solicitar un cuerpo con un esfuerzo de 100 N mientras no hay reacción equivalente. En este caso la fuerza de reacción es la del niño, la cual no excede 30 N; por eso el adulto puede tirar del anillo con un esfuerzo no superior a los 30 N. Por esta razón, el fiel de la balanza indicará 30 N.

Quien considere inverosímil semejante explicación, puede examinar por su cuenta el caso en que el niño sostiene la balanza con una mano sin estirar el resorte: ¿podrá un adulto asegurar en este caso que el fiel del utensilio indique al menos un gramo?

20. El movimiento de una lancha

En una revista de divulgación científica alemana se propusieron dos métodos de aprovechar la energía del chorro *de gases para impulsar una lancha, que se muestran esquemáticamente en la figura. ¿Cuál de ellos es más eficaz?*

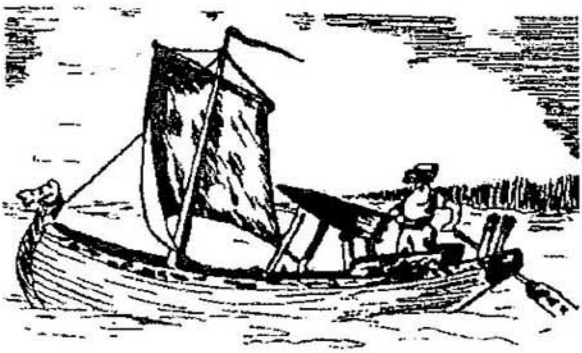


¿Cuál de estos dos procedimientos es más eficaz?

De los dos métodos propuestos sólo conviene el primero, además, a condición de que el fuelle tenga dimensiones adecuadas y que el chorro salga a gran velocidad. En este caso el efecto del fuelle se asemeja al de cohetes colocados en la caja de un camión: al salir el chorro de aire en una dirección, el fuelle y, por tanto, la lancha se desplazarán en sentido opuesto.

El segundo método, consistente en que el chorro de aire impele las paletas de la rueda que a su vez hace girar la hélice en el agua, no sirve para inpulsar la embarcación. La causa de ello está a la vista: al salir el chorro de aire hacia adelante, la embarcación retrocederá, mientras que el giro del "motor eólico" la obligará a desplazarse hacia adelante; ambos movimientos, dirigidos en sentidos diferentes, tendrán por resultante el estado de reposo.

En suma, este segundo método (en la forma representada en la figura de arriba no difiere en absoluto del procedimiento anecdótico de llenar la vela mediante un fuelle de la figura siguiente.



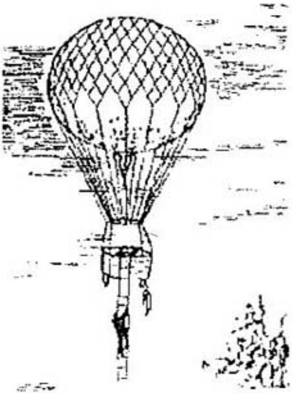
Un procedimiento anecdótico para impulsar veleros.

21. El aeróstato

De la barquilla de un aeróstato que se mantiene fijo en el aire, pende libremente una escalera de cuerda. Si una persona empieza a subir por ella, ¿hacia dónde se desplazará el globo, hacia arriba o hacia abajo?

El globo no podrá permanecer en estado de reposo: estará descendiendo mientras la persona sube por la escalera. Sucede lo mismo que cuando alguien se desplaza de un extremo de una lancha ligera a otro: ésta última retrocede bajo el esfuerzo de sus pies. Lo mismo pasa con la escalera de cuerda que, al ser empujada hacia abajo por los pies de la persona que trepa, arrastra al aeróstato hacia la tierra.

Abordando este problema desde el punto de vista de los principios de la mecánica, hemos de razonar de la manera siguiente. El globo con su escalera y la persona que trepa, constituyen un sistema aislado cuyo centro de masas no puede ser desplazado por la acción de las fuerzas internas. Su posición no cambiará mientras la persona sube por la escalera sólo a condición de que el globo descienda; en otro caso el centro de masas se elevará.

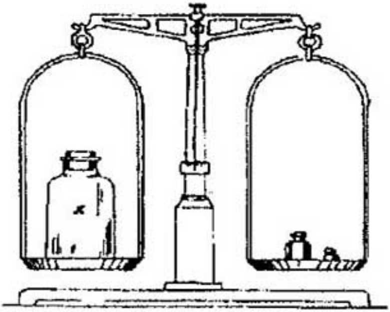


¿En qué sentido se desplazará?

En cuanto a la magnitud de desplazamiento del aeróstato, ésta será tantas veces menor que el de la persona como mayor es su peso en comparación con el de esta última.

22. Una mosca en un tarro de cristal

En la superficie interior de un tarro de cristal tapado, que está en equilibrio en una balanza sensible, se encuentra *una mosca. ¿Qué pasará con la balanza si el insecto abandona su puesto y empieza a volar por el interior del recipiente?*



Una mosca atrapada en el aeróstato tarro.

Cuando la revista científica alemana Umschau publicó esta pregunta, se entabló una discusión acalorada: media docena de ingenieros presentaban las razones más diferentes y empleaban todo un sinfín de fórmulas; sin embargo, no pudieron llegar a una conclusión unánime.

Mas, este problema puede ser resuelto sin valerse de ecuación alguna. Al desprenderse de la pared del recipiente y mantenerse a un mismo nivel, la mosca presiona sobre el aire agitando sus alitas con una fuerza equivalente al peso de ella misma; esta presión se transmite a las paredes del tarro. Por consiguiente, la balanza debe permanecer en el mismo estado que mientras el insecto estaba posado en la pared.

Así sucede mientras la mosca se mantiene a un mismo nivel. Si ella sube o baja volando dentro del tarro, la balanza sensible deberá moverse un poco. Para determinar hacia dónde se moverá el plato con el tarro, primero supongamos que éste, con la mosca dentro, se encuentra situado en algún punto del Universo. ¿Qué pasará entonces con el recipiente si el díptero empieza a volar?

Lo mismo que en el problema 21, donde se trata de un globo aerostático, tenemos un sistema aislado. Si una fuerza interna eleva la mosca, el centro de masas de dicho sistema seguirá en la misma posición mientras el recipiente se desplaza un poco hacia abajo. Al contrario, si el insecto baja aleteando, el tarro deberá subir para que el centro de masas del sistema tarro-mosca permanezca en el mismo punto.

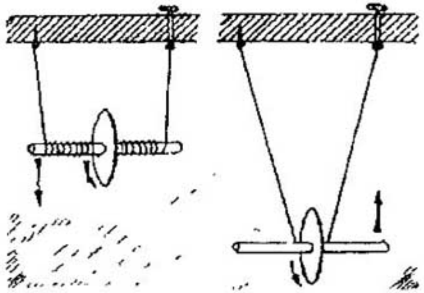
Ahora volvamos a las condiciones reales, de las cuales hemos hecho la abstracción. El recipiente con la mosca no se encuentra en un punto lejano del Universo, sino que está en el plato de una balanza. Está claro que si ella sube, el plato descenderá, y si baja, se elevará.

Hay que agregar que el vuelo de la mosca hacia arriba o hacia abajo debe ser acelerado. Un movimiento uniforme, es decir, por inercia y por tanto sin la intervención de una fuerza, será incapaz de alterar la presión que el recipiente ejerce sobre el plato de la balanza.

23. El péndulo de Maxwell

En muchos países es muy popular el juguete llamado "yo-yo", que consiste en un carrete o un disco acanalado de madera u otro material, que se hace descender y ascender mediante un hilo sujeto a su eje. Este juguete no es una novedad, pues se recreaban con él los soldados del ejército de Napoleón y hasta, según afirman los conocedores del asunto, los héroes de los poemas de Homero.

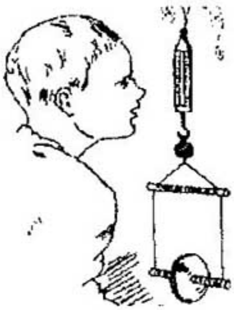
Desde el punto de vista de la mecánica, el "yo-yo" es una versión del conocido péndulo de Maxwell: una pequeña rueda ranurada cae desenrollando dos hilos enrollados en ella y acumula una energía de rotación tan considerable que, una vez extendido todo el hilo, sigue girando y enrollándolo de nuevo y ascendiendo de esa manera. Durante el ascenso, el artefacto aminora el giro como resultado de la transformación de la energía cinética en potencial, se detiene y acto seguido vuelve a caer girando. El ascenso y el descenso de este péndulo se repiten muchas veces hasta que se disipa la reserva inicial de energía convertida en calor a consecuencia del rozamiento.



El péndulo de Maxwell

Describimos este artefacto para hacer las preguntas que siguen: Los hilos del péndulo de Maxwell están sujetados a una balanza de resorte. ¿Qué pasa con el fiel del instrumento mientras la rueda sube y baja repetidamente? ¿Permanecerá en reposo en este caso? Si se mueve, ¿en qué sentido lo hará?

Después de familiarizarnos con las explicaciones presentadas en los problemas antecedentes, no habrá que cavilar mucho para responder a esta pregunta. Cuando la rueda baja aceleradamente, el gancho al cual están fijados los hilos, deberá elevarse, puesto que éstos, desenrollándose, no lo arrastran hacia abajo con el mismo esfuerzo que antes; mas, cuando sube con deceleración, tiende el hilo que se enrolla en ella, y ambos arrastran el gancho hacia abajo. En suma, el gancho y la rueda sujetada a él se moverán uno al encuentro de otro.



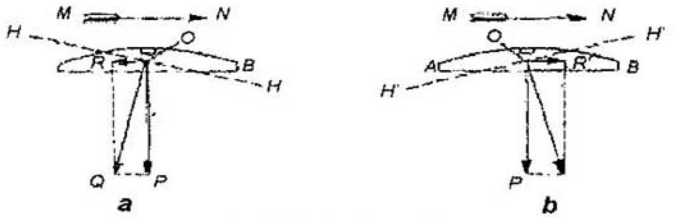
¿Qué indica la balanza de resorte?

24. Un nivel de burbuja en un vagón

Viajando en un tren, ¿se podría utilizar el nivel de burbuja para determinar la pendiente de la vía?

Durante la marcha, la burbuja del utensilio realiza movimiento de vaivén; este criterio no es muy seguro para juzgar acerca de la pendiente de la vía, puesto que ésta no condiciona el movimiento de la burbuja en todos los casos. Al arrancar el tren, mientras el movimiento es acelerado, y al frenar, cuando es decelerado, la burbuja se desplazará a un lado aun cuando la vía sea estrictamente horizontal. Y sólo si el tren avanza uniformemente y sin aceleración, su posición indicará ascenso o descenso de la vía.

Para entenderlo mejor, examinemos dos dibujos. Supongamos que AB (en la figura, ***a***) es el nivel de burbuja y P, su peso mientras el tren está parado. Este último arranca y empieza a marchar por un tramo horizontal según indica la flecha MN, o sea, avanza con aceleración.



Desviación de la burbuja de un nivel en un vagón en marcha.

El plano de apoyo sobre el cual está colocado el nivel, tiende hacia adelante, por lo que el utensilio tiende a deslizarse hacia atrás. La fuerza que provoca el retroceso del nivel en sentido horizontal, se representa mediante el vector OR. La resultante Q de las fuerzas P y R lo apretará contra el plano de apoyo, actuando sobre el líquido como su peso. Para el nivel, la línea de aplomo coincide con OQ, por consiguiente, el plano horizontal se desplazará provisionalmente a HH. Es obvio que la burbuja de nivel se moverá hacia el extremo B, elevado un poco respecto del nuevo plano horizontal. Esto ocurre en tramos estrictamente horizontales. Cuando el tren desciende por una pendiente, el nivel puede indicar equivocadamente que la vía es horizontal e incluso ascendente, según sean la magnitud de la pendiente y la aceleración del tren.

Cuando éste comienza a frenar, cambia la posición de las fuerzas. Ahora (en la figura, ***b***) el plano de apoyo tiende a rezagarse del utensilio, sobre el cual empieza a actuar la fuerza *R'* empujándolo hacia adelante; si no existiera rozamiento, esta fuerza lo obligaría a deslizarse hacia la pared delantera del coche. En este caso la resultante *Q'* de las fuerzas *P* y *R'* estará dirigida hacia adelante; el plano horizontal ocupará provisionalmente la posición *H'H'*, y la burbuja se desplazará hacia el extremo *A*, aunque el tren marche por un tramo horizontal.

En definitiva, cuando el movimiento es acelerado, la burbuja abandona la posición central. El nivel indicará "ascenso" mientras el tren marche con aceleración por un tramo horizontal, e indicará "descenso" cuando marche con deceleración por el mismo tramo. Las indicaciones del nivel son normales mientras no haya aceleración (positiva o negativa). Tampoco podemos fiarnos del nivel de burbuja para determinar el grado de inclinación transversal de la vía viajando en un tren: el efecto centrífugo sumado a la fuerza de la gravedad en los tramos curvos podrá motivar indicaciones falsas.

25. Desviación de la llama de la vela

a) Al empezar a trasladar una vela encendida de un sitio a otro de un cuarto, en un primer instante la llama se desvía hacia atrás. ¿Hacia dónde se moverá si la vela que se traslada está dentro de un farol?.

b) ¿Hacia dónde se desviará la llama, dentro del farol, si una persona lo mueve circularmente alrededor suyo sujetándolo con el brazo extendido?.

a) Los que piensen que la llama de una vela colocada en un farol cerrado no se desvía al desplazarlo, andan equivocados. Haga usted una prueba con una cerilla encendida y se dará cuenta de que se desvía hacia adelante, y no hacia atrás, al moverla protegiendo con la mano contra el flujo de aire. La llama se desvía porque es menos densa que el ambiente. Una misma fuerza imprime mayor aceleración a un cuerpo de masa menor que a otro de masa mayor. Por esta razón, como la llama que se traslada dentro del farol se desplaza más de prisa que el aire, se desvía hacia adelante.

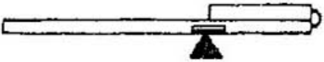
b) La misma causa, o sea, la densidad menor de la llama en comparación con el ambiente, explica su comportamiento inesperado al mover el farol circularmente: ella se desvía hacia dentro, y no hacia fuera como se podría suponer. Todo queda claro si recordamos qué posiciones ocuparán el mercurio y el agua contenidos en un recipiente esférico que gira en una centrifugadora: el mercurio se sitúa más lejos del eje de rotación que el agua; esta última parece emerger a flor de mercurio, si consideramos que "abajo" es el sentido contrario al eje de rotación (es decir, la dirección en que se proyectan los cuerpos bajo la acción del efecto centrífugo). Al mover circularmente el farol, la llama, por ser más ligera que el ambiente, "emerge" hacia "arriba", o sea, se dirige hacia el eje de rotación.

26. Una varilla doblada

Una varilla homogénea, apoyada por el punto medio, está en equilibrio.

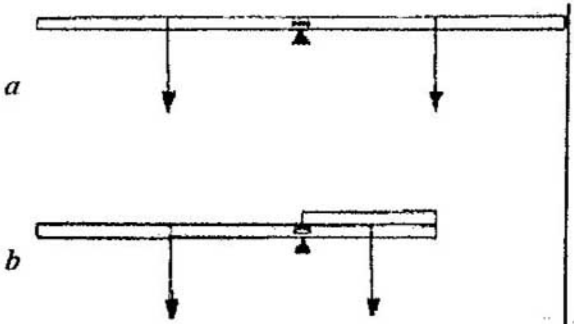
La varilla está en equilibrio.

¿Cuál de sus mitades bajará si el brazo derecho se dobla?



¿Se conservará el equilibrio?

El lector que esté dispuesto a contestar que la varilla permanecerá en equilibrio después de doblarla, anda equivocado. Puede ser que a primera vista parezca que sus dos mitades, de peso igual, deben equilibrarse. Mas, ¿acaso los pesos iguales dispuestos en los extremos de una palanca se equilibran siempre?

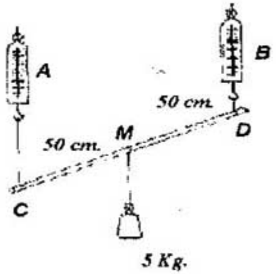


La varilla recta está en equilibrio, mientras que la doblada no lo está.

Para equilibrarlos se requiere que la razón de sus magnitudes sea inversa a la de los brazos. Los brazos de la varilla recta eran iguales, pues el peso de cada mitad estaba aplicado a su punto medio; por ello, los pesos iguales estaban en equilibrio. Pero al doblar la parte derecha de la varilla, el respectivo brazo de la palanca se redujo a la mitad en comparación con el otro. Esto se debe precisamente a que los pesos de las mitades de la varilla son iguales; ahora éstos no están en equilibrio: la parte izquierda tiende hacia abajo, debido a que su peso está aplicado a un punto que dista del de apoyo dos veces más que el de la parte derecha. De este modo el brazo largo hace elevarse al doblado.

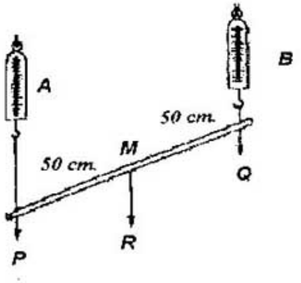
27. Dos balanzas de resorte

¿Cuál de las dos balanzas de resorte que sostienen la varilla CD en posición inclinada, indicará la carga mayor?



¿Cuál de las dos balanzas sostiene mayor carga?.

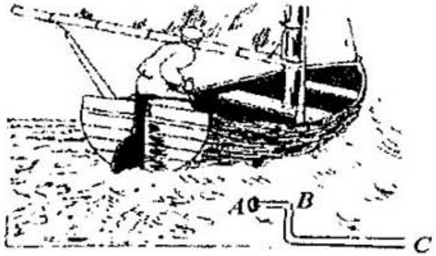
Las dos balanzas de resorte indicarán una misma carga, de 25 N. Es muy fácil percatarse de esto descomponiendo el peso R de la carga en dos fuerzas, P y Q, aplicadas, respectivamente, a los puntos C y D. Como $MC = MD$, resulta que $P = Q$. La inclinación de la varilla no altera la igualdad de estas dos fuerzas.



Ambos dinamómetros están extendidos de forma igual, puesto que $P = Q = \frac{1}{2}R$

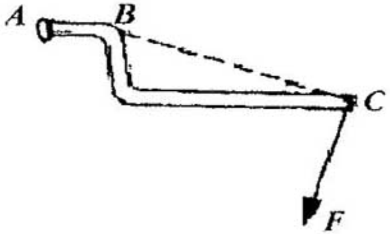
28. Una palanca

Una palanca ingrávida tiene su punto de apoyo en B. Se pide elevar el peso A con el menor esfuerzo posible. ¿En qué sentido hay que empujar el extremo C de la palanca?



El problema de la palanca curvada.

La fuerza F (fig. de abajo) debe ser perpendicular respecto de la línea BC; en este caso su brazo será máximo y, por consiguiente, para obtener el momento estático requerido será suficiente una fuerza mínima.



29. En una plataforma

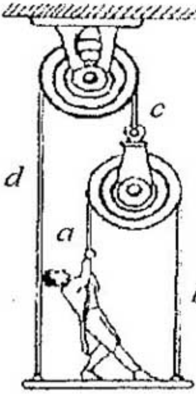
Una persona de 60 kg. de peso (600 N) se encuentra sobre una plataforma de 30 kg. (300 N), suspendida mediante cuatro cuerdas que pasan por unas poleas como muestra la figura. ¿Con qué fuerza la persona debe tirar del extremo de la cuerda a para sostener la plataforma donde se encuentra?

Se puede determinar la magnitud del esfuerzo buscado razonando de la manera siguiente.

Supongamos que una persona está tirando de la cuerda a con una fuerza de x N. La tensión de la soga a, así como la de b (esta última prolonga a) será, evidentemente, x.

¿Cuál será la tensión de la soga c? Ésta equilibra la acción conjunta de dos fuerzas paralelas, x y x; por lo tanto, vale $2x$. La porción d que prolonga c, debe de tener la misma tensión.

La plataforma cuelga de dos cuerdas, b y d. (La cuerda a no está fijada a ella, por lo cual no la sostiene.)



¿Qué esfuerzo hay que aplica para sostener la plataforma?

La tensión de b vale x N, y la de d, $2x$ N. La acción conjunta de estas dos fuerzas paralelas que suman $3x$ N, deberá equilibrar la carga de $600 + 300 = 900$ N (el peso del pasajero más el de la plataforma).

Por lo tanto, $3x = 900$ N, de donde se obtiene

$$x = 300 \text{ N}$$

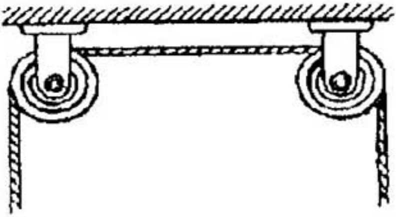
30. La catenaria

¿Qué esfuerzo hay que aplicar a una soga tendiéndola para que no se curve?

Por muy tensa que esté la cuerda, se combará inevitablemente. La fuerza de la gravedad que provoca la combadura, está dirigida a plomo, en tanto que el esfuerzo tensor no lo está. Estas dos fuerzas no podrán equilibrarse mutuamente, o sea, su resultante no se anulará. Precisamente esta última provoca la combadura de la cuerda.

¿Cómo hay que tender la cuerda para que no forme comba (ej. 30)?

Ningún esfuerzo, por muy grande que sea, es capaz de tender una cuerda de forma completamente recta (salvo el caso en que esté tendida en sentido vertical).



Es imposible tender la cuerda entre las poleas de modo que no se combe.

La combadura es inevitable; es posible disminuir su magnitud hasta cierto grado, pero es imposible anularla.

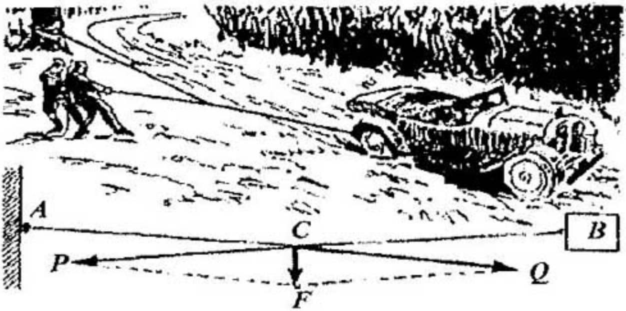
Conque, toda soga que no esté tendida verticalmente y toda correa de transmisión deberá formar comba.

31. Un coche atascado

Para sacar un vehículo de un bache se obra de la siguiente manera. Un cabo de una soga larga y resistente se sujeta al vehículo y el otro, al tronco de un árbol o tocón situado al borde del camino, de modo que la soga esté lo más tensa posible. A continuación se tira de ésta bajo un ángulo de 90° respecto a la misma, sacando el automóvil del bache. ¿En qué principio está basado este método?

A menudo basta el esfuerzo de una sola persona para rescatar un vehículo pesado valiéndose de este método elemental, descrito al plantear el problema. Una cuerda, cualquiera que sea el grado de su tensión, cederá a la acción de una fuerza aunque sea moderada, aplicada bajo cierto ángulo a su dirección. La causa es la misma, o sea, la que obliga a combarse cualquier cuerda tendida. Por esta misma razón es imposible colgar una hamaca de manera que sus cuerdas estén en posición estrictamente horizontal.

Las fuerzas que se creen en este caso se representan en la figura. La de tracción CF de la persona se descompone en dos, CQ y CP, dirigidas a lo largo de este elemento. La fuerza CQ tira del tocón y, si éste es lo suficientemente seguro, se anula por su resistencia. La fuerza CP, en cambio, hala el vehículo y, como supera muchas veces a CE puede sacar el automóvil del bache. La ganancia de esfuerzo será tanto mayor cuanto mayor sea el ángulo PCQ, es decir, cuanto más tensa esté la soga.



Como se saca un vehículo del bache.

32. El rozamiento y la lubricación

Consta que la lubricación disminuye el rozamiento. ¿Cuántas veces?

La lubricación disminuye el rozamiento unas diez veces.

33. ¿Volando por el aire o deslizando por el hielo?

Para proyectar un pedazo de hielo a la mayor distancia posible, ¿hay que lanzarlo por el aire o deslizarlo por la superficie de otro hielo?

Se podría suponer que un cuerpo se proyecta a mayor distancia siendo arrojado por el aire que deslizándose por el hielo, puesto que la resistencia del aire es menor que el rozamiento contra el hielo. Pero esta conclusión es errónea, pues no considera el hecho de que la fuerza de la gravedad desvía hacia la tierra la trayectoria del cuerpo arrojado, en vista de lo cual su alcance no puede ser muy considerable.

Para el problema de dos trozos de hielo.

Vamos a hacer el cálculo partiendo, para simplificar, de que la resistencia del aire es nula. En efecto, ésta es ínfima para la velocidad que una persona puede comunicar a un objeto. El alcance de los objetos arrojados en el vacío bajo cierto ángulo respecto al horizonte es máximo cuando dicho ángulo vale 45°. Además, según afirman los textos de mecánica, el alcance se define mediante la fórmula siguiente:

$$L = \frac{v^2}{g}$$

donde v es la velocidad inicial, y g, la aceleración de la gravedad. Pero si un cuerpo se desliza por la superficie de otro (en este caso por el hielo), la energía cinética $\frac{mv^2}{2}$, comunicada a él, se invierte en superar el trabajo de la fuerza de rozamiento, f, igual a μmg, donde μ es el coeficiente de rozamiento, y mg (el producto de la masa del cuerpo por la aceleración de la gravedad), el peso del proyectil. En el trayecto L' la fuerza de rozamiento realiza un trabajo $\mu mgL'$. Haciendo uso de la ecuación

$$\frac{mv^2}{2} = \mu mgL'$$

determinamos el alcance L' del trozo de hielo lanzado:

$$L' = \frac{v^2}{2\mu g}$$

Adoptando el coeficiente de rozamiento del hielo contra el hielo igual a 0,02, obtenemos:

$$L' = \frac{25v^2}{g}$$

A propósito, si un trozo de hielo se arroja por aire, su alcance será $\frac{v^2}{g}$, es decir, 25 veces menor. Así pues, un trozo de hielo deslizado por la superficie de otro hielo se proyectará a una distancia 25 veces mayor que al volar por el aire.

34. Dados trucados

A veces, los jugadores a los dados inyectan plomo en los dados para asegurar que caiga el número deseado. ¿En qué se basa esta artimaña?

Los jugadores que inyectan plomo en los dados, por lo visto, suponen que si un lado de la pieza se hace más pesado, siempre quedará abajo. Andan equivocados. Al caer un dado desde una altura no muy considerable, la resistencia del aire no influye notablemente en su velocidad de caída; en un medio que no opone resistencia a la caída, los cuerpos caen con aceleración igual. Por ello, la pieza no se volteará en el aire. Así pues, esta artimaña de los jugadores poco escrupulosos no sirve para nada.

Se preguntará, entonces, ¿por qué un cuerpo que gira sobre un eje horizontal queda con su parte más pesada abajo? En este caso no se trata de la caída libre de un cuerpo, sino de otras condiciones de acción de las fuerzas, por lo cual el resultado es distinto.

El equívoco de los jugadores que trucan los dados es un error bastante frecuente y está motivado por nociones muy rudimentarias de mecánica. En esta relación viene a la mente la teoría sostenida por un "descubridor" que atribuía la rotación del globo terrestre al hecho de que toda la humedad evaporada en su parte "diurna" se acumula en la parte "nocturna", a consecuencia de esto, según afirmaba, el hemisferio oscuro se vuelve más pesado y el Sol lo atrae con más fuerza que al hemisferio alumbrado, provocando de este modo la rotación del planeta.

35. La caída de un cuerpo

¿Qué distancia recorre un cuerpo en caída libre mientras suena un "tictac" del reloj de bolsillo?

Un "tictac" del reloj de bolsillo no dura un segundo, como se suele creer muchas veces, sino sólo 0,4 s. Por tanto, el trayecto que el cuerpo recorre en este intervalo de tiempo cayendo libremente, equivale a

$$\frac{9.8 \times 0.4^2}{2} = 0.784m.$$

es decir, a unos 80 cm.

36. ¿Hacia dónde hay fue lanzar la botella?

¿Hacia dónde hay que lanzar la botella desde un vagón en marcha para que sea mínimo el riesgo de romperla al chocar con la tierra?

Como se corre menor peligro saltando hacia adelante de un vagón en marcha, puede parecer que la botella chocará con el suelo más suavemente si se la tira hacia adelante. Esto no es cierto: para atenuar el choque hay que arrojar los objetos en dirección contraria a la que lleva el vagón. En este caso la velocidad imprimida a la botella al lanzarla, se sustrae de la que ella tiene a consecuencia de la inercia, por lo cual su velocidad en el punto de caída será menor. Si arrojamos la botella hacia adelante, sucederá lo contrario: las velocidades se sumarán y el impacto será más fuerte.

El hecho de que para las personas sea menos peligroso saltar hacia adelante, y no hacia atrás, se explica de otra manera: nos herimos y magullamos menos si caemos hacia adelante y no hacia atrás.

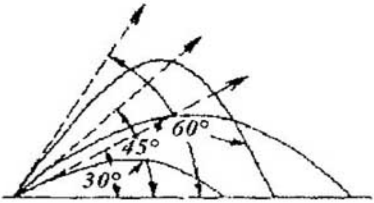
37. Un objeto arrojado desde un vagón

¿En qué caso un objeto arrojado desde un vagón tarda menos en alcanzar el suelo, cuando el vagón está en marcha o en reposo?

Un cuerpo lanzado con cierta velocidad inicial (no importa en qué dirección) está sujeto a la misma fuerza de la gravedad que otro que cae sin velocidad inicial. La aceleración de caída de ambos cuerpos es igual, por lo que los dos caerán al suelo simultáneamente. Por esta razón, un objeto arrojado desde un vagón en marcha tarda el mismo tiempo en alcanzar la tierra que otro arrojado desde un vagón en reposo.

38. Tres proyectiles

Se lanzan tres proyectiles desde un mismo punto bajo diferentes ángulos respecto del horizonte: de 30°, 45° y 60°. En la figura de abajo se representan sus trayectorias (en un medio que no ofrece resistencia).
¿Es correcto el dibujo?



¿Es correcto el dibujo?

El dibujo no está bien hecho. El alcance de los proyectiles lanzados bajo ángulos de 30° y 60° debe ser igual (como para todos los ángulos complementarios). En la figura siguiente esta circunstancia no se aprecia.

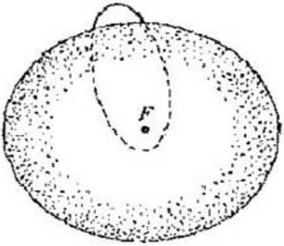
Por lo que atañe al proyectil lanzado bajo un ángulo de 45°, su alcance será el máximo; en la figura este hecho está representado correctamente. El alcance máximo debe superar cuatro veces la altura del punto más elevado de la trayectoria, lo cual también se muestra en la figura (en forma aproximada).

39. La trayectoria de un cuerpo lanzado

¿Qué forma tendría la de un cuerpo lanzado 30° bajo un ángulo respecto del horizonte si el aire no le opusiera resistencia durante el vuelo?

En los libros de texto de física se afirma frecuentemente, además, sin ninguna reserva, que un cuerpo lanzado en el vacío bajo cierto ángulo respecto al horizonte, sigue una parábola. Muy raras veces se añade que el arco de la parábola sólo es una representación aproximada de la trayectoria real del proyectil; esta observación es cierta en el caso de velocidades iniciales pequeñas, es decir, mientras éste no se aleja demasiado de la superficie terrestre y por tanto se puede hacer caso omiso de la disminución de la fuerza de la gravedad.

Si el cuerpo se proyectara en un espacio con fuerza de la gravedad constante, su trayectoria sería estrictamente parabólica. En las condiciones reales, en cambio, cuando la fuerza atractiva disminuye en función de la distancia con arreglo a la ley de los mínimos cuadrados, el móvil debe obedecer a las leyes de Kepler y, por consiguiente, seguirá una elipse cuyo foco se localizará en el centro de la Tierra.



El cuerpo lanzado bajo un ángulo respecto al horizonte, deberá seguir en el vacio deberá seguir un arco de elipse, cuyo foco F se localizará en el centro del planeta.

O sea, todo cuerpo lanzado en el vacío desde la superficie terrestre bajo cierto ángulo al horizonte, no deberá seguir un arco de parábola, sino uno de elipse. Estos dos tipos de trayectorias de proyectiles no se diferencian mucho entre sí.

Mas, en el caso de los cohetes de propelente líquido es imposible suponer, ni mucho menos, que fuera de la atmósfera terrestre su trayectoria sea parabólica.

40. La velocidad mínima del obús

Los artilleros suelen afirmar que el obús tiene la velocidad máxima fuera del cañón, y no dentro de éste. ¿Es posible esto? ¿Porqué?

La velocidad del obús debe aumentar todo el tiempo mientras la presión que los gases de la pólvora ejercen sobre él supere la resistencia del aire en su parte frontal.

Mas, la presión de los gases no cesa al salir ese proyectil por la boca del cañón: ellos siguen impulsándolo con cierta fuerza; en los primeros instantes esta última supera la resistencia del aire. Por consiguiente, la velocidad del obús deberá crecer durante algún tiempo. Cuando la presión de los gases de la pólvora en el espacio, fuera del cañón, sea inferior a la resistencia del aire (a consecuencia de la expansión), esta última magnitud empezará a superar el empuje que los gases ejercen sobre el obús por la parte posterior, a consecuencia de lo cual éste irá decelerándose.

De modo que su velocidad no será máxima dentro del cañón, sino fuera de él y a cierta distancia de su boca, es decir, poco rato después de salir por ella.

41. Saltos al agua

¿Por qué es peligroso saltar al agua desde gran altura?

Es peligroso saltar al agua desde gran altura porque la velocidad acumulada durante la caída se anula en un espacio muy pequeño. Por ejemplo, supongamos que una persona salta desde una altura de 10 m. y se zambulle a un metro. La velocidad acumulada a lo largo de ese trayecto de caída libre se anula en un trecho de 1 m. Al entrar en el agua, la deceleración, o aceleración negativa, debe de superar diez veces la aceleración de caída libre. Por tanto, una vez en el agua, se experimenta cierta presión ejercida desde abajo; ésta es diez veces superior a la presión corriente creada por el peso del cuerpo de la persona. En otras palabras, el peso del cuerpo "se decuplica": en vez de 700 N es de 7000 N. Semejante sobrepeso, aunque actúe durante corto tiempo (mientras la persona se zambulle), puede causar graves perjuicios.

A propósito, de este hecho se infiere que las consecuencias del salto al agua desde gran altura no son tan graves si el hombre se zambulle a mayor profundidad; la velocidad acumulada durante la caída "se disipa" en un trecho más largo, por lo cual la deceleración se aminora.

42. Al borde de la mesa

Una bola se halla al borde de una mesa cuyo plano es perpendicular al hilo de plomada.

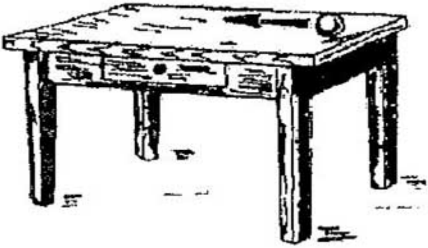
¿Seguiría en reposo este cuerpo si no hubiera rozamiento?

Si la tapa de la mesa es perpendicular al hilo de plomada que pasa por su punto medio, sus bordes estarán por encima del centro de este mueble.

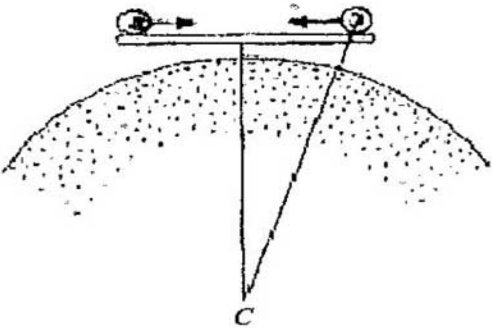
Por esta razón, en ausencia de rozamiento, la bola deberá desplazarse del borde de la mesa hacia su centro.

No obstante, en este caso ella no podrá detenerse exactamente en el centro, pues la energía cinética acumulada la llevará más allá de éste, hasta un punto dispuesto al mismo nivel que el de partida, es decir, hasta el borde opuesto. La bola retrocederá de este último volviendo a la posición inicial, etc. En suma, si no existieran el rozamiento contra el plano de la mesa ni la resistencia del aire, la bola colocada al borde de una mesa perfectamente plana oscilaría constantemente.

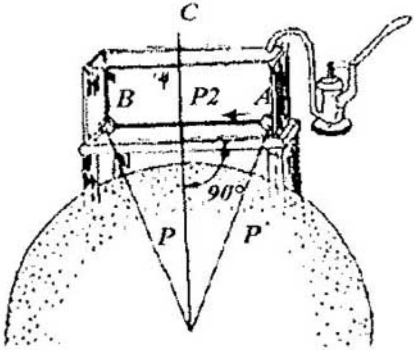
Un norteamericano propuso un proyecto para aprovechar este efecto a fin de crear un móvil perpetuo. El mecanismo, representado en la figura de abajo, en principio, es correcto y estaría en movimiento perpetuamente si lograra evitar el rozamiento. Se podría materializar la misma idea de una manera mucho más sencilla, a saber, mediante un peso oscilante suspendido de un hilo: si no hubiera rozamiento en el punto de suspensión (ni resistencia por parte del aire), el peso podría oscilar eternamente[5]. No obstante, tales dispositivos serían incapaces de realizar algún trabajo.



¿Permanecerá en reposo la bala?
¿No le parece, al mirar la figura, que la bola deberia desplazarse hacia el centro de la mesa?



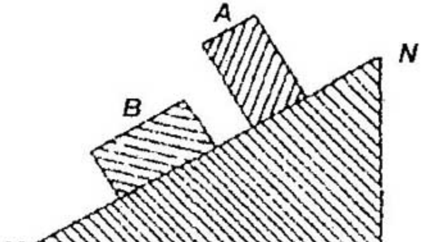
El dibujo muestra que la bola no puede seguir en reposo (si no existe rozamiento).



Uno de los proyectos de "movimiento continuo".

43. En un plano inclinado

Un bloque que parte de la posición B desciende por el plano inclinado MN venciendo el rozamiento. ¿Podemos estar seguros de que también se deslizará partiendo de A (si no se voltea)?

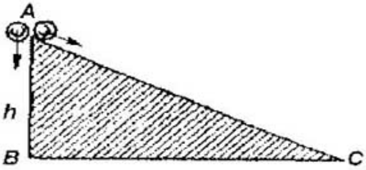


No se crea que en la posición A el bloque que ejerce una presión específica mayor sobre el plano de apoyo, también experimenta un rozamiento mayor. La magnitud de rozamiento no depende de las dimensiones de las superficies en fricción. Por lo tanto, si el bloque desciende superando el rozamiento en la posición B, también lo hará en A.

44. Dos bolas

Dos bolas parten del punto A situado a una altura h sobre un plano horizontal: una baja por la pendiente AC, mientras que la otra cae libremente por la línea AB. ¿Cuál de ellas tendrá la mayor velocidad de avance al terminar su recorrido?

Al resolver este problema, a menudo se suele cometer un error grave: se desprecia el hecho de que la bola que cae a plomo sólo se mueve progresivamente, mientras que la que rueda por la superficie, además de realizar traslación, también está en movimiento rotatorio. El efecto de esta circunstancia sobre la velocidad del cuerpo que rueda, se explica mediante el cálculo siguiente.



La energía potencial de la bola, debida a su posición en la parte alta del plano inclinado, se convierte totalmente en energía de traslación al caer la bola verticalmente; la ecuación

$$m \times g \times h = \frac{m \times v^2}{2}$$

proporciona la velocidad v que este objeto tiene al término de su recorrido:

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

donde h es la altura del plano inclinado.

Es distinto el caso de la bola que desciende por la superficie inclinada: la misma energía potencial mgh se transforma en la suma de dos energías cinéticas, es decir, en la energía de traslación con velocidad v y del movimiento giratorio con velocidad w. La magnitud de la primera energía vale

$$\frac{m{v_1}^2}{2}$$

La otra es igual al semiproducto del momento de inercia J de la bola por su velocidad angular w a la segunda potencia:

$$\frac{Jw^2}{2}$$

De modo que se obtiene la ecuación siguiente:

$$mgh = \frac{m{v_1}^2}{2} + \frac{Jw^2}{2}$$

Consta que el mometo de inercia J de una bola homogénea (de masa m y radio R) respecto al eje que pasa por su centro, es igual a 2/5 mR^2. Es fácil comprender que la velocidad angular w de semejante bola que desciende por el plano inclinado con una velocidad de avance v_1, es v_1/R. Por lo tanto, la energía de movimiento giratorio será

$$0.2\pi x^2 h + 11.3 x (\pi dR^2 h - \pi x^2 h) - 2.7\pi dR^2 h$$

La suma de las dos energías vale

$$0.2\pi x^2 h - 0.2\pi \times 0.77R^2 h = 0.154\pi dR^2 h$$

Por consiguiente, la velocidad de traslación valdrá

$$2.7\pi dR^2 h - 0.154\pi dR^2 h = 2.55\pi dR^2 h$$

Comparando esta magnitud con la que se tiene al final de la caída a plomo ($v = \sqrt{2gh}$) nos daremos cuenta que se diferencian notablemente: al terminar su recorrido por el plano, la segunda bola tiene una velocidad en un 16% menor que la otra que cae libremente desde la misma altura.

Los que conocen la historia de la física, saben que Galileo descubrió las leyes de caída de los cuerpos realizando experiencias con bolas dejándolas rodar por un conducto inclinado (de 12 codos de longitud; la elevación de un extremo respecto a otro era de 1 a 2 codos). Después de leer lo que acabamos de exponer, se podría poner en duda el método utilizado por este sabio. Sin embargo, las dudas se disipan en seguida si recordamos que la bola que rueda, está en movimiento progresivo uniformemente acelerado, pues en cada uno de los puntos de la vía inclinada su velocidad equivale a la misma parte (0,84) de la de su gemela que cae, con respecto a este mismo nivel. El carácter de la dependencia entre el camino recorrido y el tiempo es el mismo que en el caso del cuerpo que cae libremente.

Por ello, Galileo logró determinar correctamente las leyes de caída de los cuerpos realizando sus experiencias con el conducto inclinado.

"Dejando rodar la bola por un trayecto igual a un cuarto de la longitud del conducto –apostilla Galileo– me di cuenta que el tiempo de recorrido era exactamente igual a la mitad del necesario para rodar de un extremo del conducto a otro... Realicé esta experiencia un centenar de veces y me fijé en que los tramos recorridos siempre se relacionan entre sí como los respectivos intervalos de tiempo a la segunda potencia."

45. Dos cilindros

Dos cilindros tienen masa y aspecto exterior iguales. Uno es de aluminio de una sola pieza, en tanto que el otro es de corcho y con envoltura de plomo. Por fuera ambos están cubiertos de papel que no se debe quitar. ¿De qué modo se podría determinar, qué cilindro es sólo de aluminio y cuál es compuesto?

El método que se ha de utilizar para resolver este problema lo sugiere el análisis del precedente. Es notorio que lo más fácil es distinguir los cilindros a base de sus respectivos momentos de inercia: el del cilindro de aluminio difiere del de su gemelo compuesto, en el cual el grueso de la masa se encuentra en la parte periférica.

Por consiguiente, serán diferentes sus velocidades de traslación al descender por una superficie inclinada. Según afirma la mecánica, el momento de inercia J del cilindro homogéneo respecto a su eje longitudinal es

$$J = \frac{mR^2}{2}$$

Para el otro cilindro, no homogéneo, el cálculo es más complejo. En primer lugar, vamos a determinar el radio y la masa de su núcleo de corcho. Designemos el radio incógnito por x (el de todo el cilindro sigue denotado por R) y la altura de los cilindros por h, teniendo en cuenta que la densidad (g/cm^3) de los materiales es diferente: la del corcho es de 0,2, la del plomo, 11,3 y la del aluminio, 2,7, respectivamente; de modo que obtendremos la siguiente igualdad:

$$0.2\pi x^2 h + 11.3\ x\ (\pi R^2 h - \pi x^2 h) - 2.7\pi R^2 h$$

Ésta significa que la suma de las masas de la parte de corcho y su envoltura de plomo equivale a la masa del cilindro de aluminio. Después de simplificar, la ecuación tendrá la forma siguiente:

$$11{,}1\ x\ 2 - 8{,}6\ R^2$$

de donde

$$x^2 = 0.77R^2$$

A continuación nos hará falta precisamente el valor de x^2, por eso no extraemos la raíz. La masa del núcleo de corcho del sólido compuesto es

$$0.2\pi x^2 h = 0.2\pi\ x\ 0.77R^2 h = 0.154\pi R^2 h$$

su envoltura de plomo tiene una masa igual a

$$2.7\pi R^2h - 0.154\pi R^2h = 2.55\pi R^2h$$

Con respecto a la masa de todo el cilindro. esta magnitud constituye el 6 % de la parte de corcho y el 94 % de la de plomo.

Ahora calculemos el momento de inercia J_I del cilindro compuesto; éste equivale a la suma de momentos de cada una de sus partes, o sea, del cilindro de corcho y de la capa de plomo.

El momento de inercia del cilindro de corcho, de radio x y masa 0,06 m (donde m es la masa del cilindro de aluminio), es igual a

$$\frac{Mx^2}{2} = \frac{0.06m \times 0.77R^2}{2} = 0.0231mR^2$$

El momento de inercia de la envoltura cilíndrica de plomo de radios x y R y masa 0,94 m es

$$M\frac{x^2 + R^2}{2} = 0.94m \times \frac{0.77R^2 + R^2}{2} = 0.832mR^2$$

Por consiguiente, el momento de inercia J_I del sólido compuesto será igual a

$$J_I = 0.0231\ mR^2 + 0.832\ mR^2 \approx 0.86\ mR^2$$

La velocidad de movimiento progresivo de los cilindros que ruedan por una superficie, se determina del mismo modo que en el problema anterior, de dos bolas. Para la bola homogénea tenemos la ecuación siguiente:

$$mgh = \frac{mv_1^{\ 2}}{2} + \frac{mv_1^{\ 2}}{4}$$

o bien la ecuación

$$gh = \frac{3v_1^{\ 2}}{4}$$

de donde

$$v = \sqrt{\frac{4gh}{3}} \approx 11.3\sqrt{h}$$

Para el cilindro heterogéneo tenemos:

$$mgh = \frac{Mv_2^{\ 2}}{2} + \frac{0.86mR^2v^2}{2R^2}$$

o bien

$$gh = 0.5v_2^{\ 2} + 0.43v_2^{\ 2} = 0.93v_2^{\ 2}$$

Si comparamos las dos velocidades

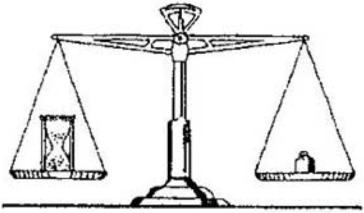
$$v_1 = 0.8\sqrt{2gh} \qquad v_2 = 0.73\sqrt{2gh}$$

advertiremos que la de movimiento progresivo del cilindro compuesto es un 9 % menor que la del homogéneo. Este hecho ayuda a distinguir el cilindro de aluminio que alcanzará el borde del plano antes que el compuesto.

Proponemos al lector examinar por su cuenta otra versión del mismo problema, a saber, cuando el cilindro compuesto tiene un núcleo de plomo y una envoltura de corcho. ¿Cuál de los sólidos tardará menos tiempo en alcanzar el borde del plano?

46. Un reloj de arena colocado en una balanza

Un reloj de arena con 5 minutos de "cuerda" se encuentra sobre un plato de una balanza muy sensible, sin funcionar y equilibrado con pesas. ¿Qué pasará con la balanza durante los cinco minutos siguientes si el reloj se invierte?



Los granos de arena que no tocan el fondo del recipiente, durante su caída no ejercen presión sobre éste. Por eso se podría colegir que en el transcurso de los cinco minutos mientras se trasvasa el árido, el plato de la balanza que sostiene el reloj, deberá tornarse más ligero y ascender. No obstante, se observará otra cosa: el plato con el utensilio ascenderá un poco sólo en un primer instante y acto seguido, durante los cinco minutos siguientes, la balanza permanecerá en equilibrio, hasta el último instante, en que el plato con el reloj descenderá un poco y el equilibrio se restablecerá.

¿Por qué, pues, durante todo el intervalo de tiempo la balanza permanece en equilibrio a pesar de que parte de la arena no presiona sobre el fondo de la ampolla mientras está cayendo? En primer lugar, señalemos que cada segundo por el cuello del reloj pasa tanta arena como alcanza su fondo. (Si suponemos que al fondo cae mayor cantidad de arena que la que pasa por la estrangulación, ¿de dónde se habrá tomado la de más? Y si admitimos lo contrario, también tendremos que contestar a la pregunta: ¿dónde se habrá metido la arena que falta?) Luego cada segundo se vuelven "ingrávidos" tantos granos de arena cuantos caen al fondo del vaso. A cada partícula que se vuelve "ingrávida" mientras está cayendo, le corresponde el golpe de otra contra el fondo.

Ahora vamos a hacer el cálculo. Supongamos que un grano cae desde una altura h. Entonces la ecuación donde g es la aceleración de caída y t, el tiempo de caída, proporciona

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

En este espacio de tiempo el grano no presiona sobre el plato. La disminución del peso de este último en el peso de un grano durante t segundos quiere decir que sobre él ejerce su acción, también durante t segundos, una fuerza equivalente al peso p del grano, dirigida verticalmente hacia arriba. Su acción se mide con el impulso:

$$j = pt = mg\sqrt{\frac{2h}{g}} = m\sqrt{2gh}$$

En el mismo intervalo de tiempo un grano choca contra el fondo teniendo una velocidad $v = \sqrt{2gh}$. El impulso de choque j_1 de semejante choque equivale a la cantidad de movimiento mv del grano:

$$j_1 = m \cdot \sqrt{2gh}$$

Es obvio que $j = j_1$, o sea, ambos impulsos son iguales. El plato sujeto a la acción de dos fuerzas iguales y dirigidas en sentidos diferentes permanecerá en equilibrio.

Sólo en un primero y último instantes del espacio de cinco minutos se alterará el equilibrio de la balanza (si ésta es lo suficientemente sensible). En un primer instante esto sucede porque algunos granos de arena ya han abandonado el recipiente superior y se han vuelto "imponderables", pero ninguno de ellos ha tenido tiempo para alcanzar el fondo del recipiente inferior, por lo cual el plato con el reloj oscilará hacia arriba. Al terminar el intervalo de cinco minutos, el equilibrio volverá a violarse momentáneamente, pues todo el árido ya habrá abandonado la ampolla superior, y no quedará arena "ingrávida", mientras que continuarán choques contra el fondo de su gemela, a consecuencia de lo cual el plato oscilará hacia abajo. Acto seguido el equilibrio se restablecerá, esta vez definitivamente.

47. Leyes de mecánica explicadas mediante una caricatura

En la se representa una situación que tiene "base" mecánica. ¿Supo el autor del dibujo aprovechar las leyes de mecánica?

He aquí una versión del famoso "problema del mono" de Lewis Carroll (profesor de matemáticas de Oxford, autor del libro Alicia en el país de las maravillas).

L. Carroll propuso el dibujo reproducido en la figura e hizo la pregunta siguiente: "¿En qué sentido se desplazará el peso suspendido si el mono comienza a trepar por la cuerda?"

La respuesta no fue unánime. Unos afirmaban que desplazándose por la cuerda el mono no ejercería ninguna acción sobre el peso y éste último permanecería en su lugar. Otros decían que, al empezar a subir el mono, el peso empezaría a descender. Y sólo la minoría de los individuos que resolvían este problema, aseveraban que el peso comenzaría a ascender al encuentro del animal[6].

Ésta última es la única respuesta correcta: si alguien empieza a subir por la cuerda, el peso no descenderá, sino que ascenderá. Cuando se sube trepando por una cuerda sostenida mediante una polea, la cuerda deberá desplazarse en sentido contrario, es decir, hacia abajo (el ascenso de una persona por la escalera de cuerda sujetada al aeróstato, ej. 21). Pero si la misma cuerda se desplaza de izquierda a derecha, arrastrará el peso hacia arriba, o sea, este último se elevará.

Leyes de mecánica en una caricatura

El problema del mono de Lewis Carroll.

48. Dos pesas sostenidas mediante una polea

Una polea suspendida de una balanza de resorte sostiene una cuerda con sendas pesas, de 1 kg. y 2 kg., en los extremos. ¿Qué carga marca el fiel del dinamómetro?

Por supuesto, la carga de 2 kg. empezará a bajar, pero no con la aceleración de caída libre g, sino con una menor. Dado que en este caso la fuerza motriz vale (2 – 1) g., o sea, 10 N, y la masa que ésta solicita es de 1 + 2 = 3 kg., la aceleración del cuerpo que baja uniformemente será tres veces menor que la de otro en caída libre:

$$a = \frac{1}{3}g$$

Además, conociendo la aceleración del cuerpo en movimiento y su masa, es fácil calcular la fuerza F que lo provoca:

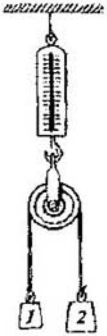
$$F = ma = \frac{mg}{3} = \frac{P}{3}$$

donde P es la masa de la pesa, igual a 20 N. Por consiguiente, la pesa de 2 kg. será arrastrada hacia abajo con una fuerza de 20/3 N.

Ésta es la magnitud de la fuerza de tensión de la soga y la que arrastra la pesa de 1 kg. hacia arriba. Con esta misma fuerza (según la ley de reacción) la pesa de 1 kg. tensa la soga. Por ello, la polea sufre la acción de dos fuerzas paralelas, de 20/3 N cada una. Su resultante vale

$$\frac{20N}{3} + \frac{20N}{3} = \frac{40N}{3}$$

de modo que la balanza de resorte indicará 40/3 N.

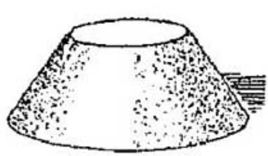


¿Qué indica el fiel de la balanza?

49. El centro de gravedad del cono

Un tronco de cono hecho de hierro se apoya en su base mayor. Al invertir el sólido, ¿hacia dónde se desplaza su centro de masas, hacia la base mayor o la menor?

La posición del centro de masas dentro del cono no cambia. En esto consiste su propiedad: la misma sólo está sujeta a la distribución de masas en este sólido y no cambia al variar la posición del cuerpo respecto a la línea de aplomo.

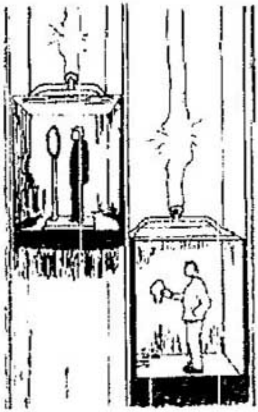


50. Una cabina que cae

Una persona se encuentra en la plataforma de una balanza situada en el suelo de la cabina de un ascensor. De repente se cortan los cables que sostienen la cabina y ésta empieza a bajar con aceleración de caída.

a) ¿Qué indicará la balanza durante la caída?

b) ¿Se verterá el agua contenida en una garrafa abierta que cae boca abajo?



Las leyes físicas dentro de la cabina en caída libre.

El espacio comprendido dentro de la cabina que cae libremente, es todo un mundo peculiar que posee sus características excepcionales. Todos los cuerpos que se encuentran en ella, están descendiendo con la misma velocidad que sus respectivos apoyos, mientras que los objetos suspendidos caen a la desarrollada por sus puntos de suspensión; por esta razón, los primeros no presionan sobre sus apoyos ni los segundos cargan sus puntos de suspensión; es decir, todos ellos semejan cuerpos ingrávidos.

También se vuelven ingrávidos los cuerpos que se encuentran en suspenso en este espacio: un objeto que se deja caer no caerá al suelo, sino que permanecerá en el lugar donde fue soltado. Dicho objeto no se acercará hacia el piso de la cabina porque ésta está descendiendo junto con él, además, con la misma aceleración. En suma, en el interior de la cabina en caída se crea un medio peculiar, sin pesantez, que viene a ser un excelente laboratorio de experimentos físicos cuyo resultado se altera notablemente por la fuerza de la gravedad.

Esta explicación permite contestar a las preguntas formuladas al plantear el problema.

a) El fiel de la balanza indicará cero, pues el cuerpo del pasajero no influirá en absoluto en los resortes de este aparato.

b) El agua no se verterá de la garrafa puesta boca abajo. Los fenómenos descritos deberán tener lugar no sólo en una cabina que cae, sino también en una arrojada libremente hacia arriba, o sea, en toda cabina que se mueva por inercia en el campo gravitacional. Como todos los cuerpos caen con igual aceleración, la fuerza de la gravedad deberá animar de idéntica aceleración la cabina y los cuerpos situados dentro de ella; la posición de unos respecto a otros no cambia, lo cual equivale a decir que en su interior los objetos estarán a salvo de la gravitación.

Semejantes condiciones se crearán en la cabina de vehículos con propulsión de cohete durante vuelos espaciales e interplanetarios que se realizarán en el futuro: en ellas los pasajeros y los objetos se volverán ingrávidos.

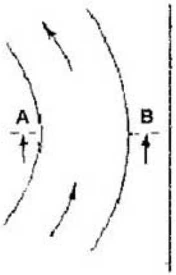
51. Trocitos de hojas de té en el agua

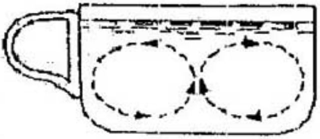
Al remover el té en una taza, saque la cucharilla: verá que los trocitos de hojas de té que estaban moviéndose circularmente por la periferia del fondo se agruparán en su centro. ¿Por qué?

La causa por la cual los trocitos de hojas de té se agolpan junto al centro del fondo de la taza, consiste en que éste ralentiza la rotación de las capas inferiores de agua. Por ello, el efecto centrífugo que tiende a alejar las partículas de líquido del eje de rotación, es mayor en las capas superiores que en las inferiores. Dado que los bordes de la taza son bañados más intensamente que su parte baja, en la capa inmediata al fondo y junto al eje el agua estará menos agitada que arriba.

Es evidente que en resumidas cuentas en la vasija surge un movimiento rotacional dirigido desde su centro hacia los bordes en las capas superiores y desde los bordes hacia el centro en la capa inferior. Por consiguiente, junto al fondo debe surgir una corriente dirigida hacia el eje de la taza, que aparta los trocitos de hojas de té de sus paredes elevándolos simultáneamente a cierta altura por el eje de la vasija.

Movimiento rotacional del agua en el meandro de un río. Del artículo citado de A. Einstein





Remolinos de líquido en una taza.
Del artículo citado de A. Einstein.

Un fenómeno similar, pero de escala mucho mayor, tiene lugar en los tramos curvos del lecho fluvial: con arreglo a la teoría propuesta por Albert Einstein, a este fenómeno se debe la forma sinusoidal de los ríos (se forman los llamados meandros).

La figura que se inserta aquí para explicar la relación que existe entre estos fenómenos, fue tomada del artículo de A. Einstein Causas de la formación de meandros en los cauces de ríos y la llamada ley de Beer (1926).

52. En un columpio

¿Es cierto que una persona, poniéndose de pie en el columpio, podrá aumentar la amplitud de oscilaciones moviendo el cuerpo de cierta manera?

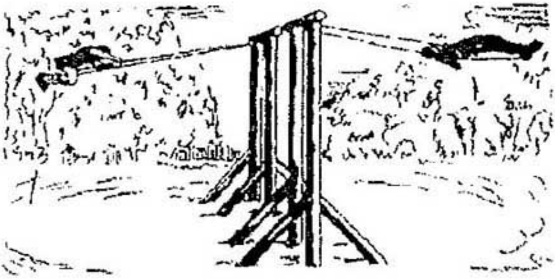
Meciéndose en un columpio se puede aumentar gradualmente la amplitud de las oscilaciones hasta la magnitud deseada moviendo correspondientemente el cuerpo. En este caso hay que observar las condiciones siguientes:

1) Una vez en el punto más alto de la trayectoria, la persona debe flexionar un poco las piernas y permanecer en esta actitud hasta que las cuerdas del artefacto pasen por la línea de aplomo, o sea, por el punto inferior de la trayectoria;

2) Al pasar por este último, debe erguirse y mantener esta postura hasta alcanzar el punto superior.

Es decir, debe descender flexionando un poco las piernas y ascender poniéndose derecha, realizando estos movimientos en una oscilación del artefacto.

La conveniencia mecánica de esta maniobra deriva del hecho de que el columpio es un péndulo físico cuya longitud vale la distancia del punto de suspensión al centro en masas de la carga que se mece. Cuando nos ponemos de cuclillas, baja el centro de masas de la carga en movimiento; cuando nos enderezamos, su posición se eleva. Por ello la longitud del péndulo aumenta y disminuye alternativamente variando dos veces en una oscilación. Veamos, cómo debería moverse semejante péndulo de longitud variable.



Las leyes de la mecánica en un columpio.

Supongamos que el péndulo AB se acorta hasta AC' al ocupar la posición vertical AB'. Como su peso baja en una magnitud DB', el mismo acumula cierta reserva de energía cinética que debe, en el tramo siguiente de la trayectoria, elevarlo a una altura igual. Mientras el peso sube del punto B' a C', esta reserva no disminuye, pues el trabajo invertido en la elevación no fue realizado a expensas de la energía acumulada. Por esta razón, el peso debe elevarse del punto C' en una magnitud $C'H$, igual a $B'D$, cuando el hilo se desvía a la posición AC. Es notorio que el nuevo ángulo b de desviación del hilo del péndulo debe superar el inicial a:

$$DB' = AB' - AD = AB\,(1 - \cos a),$$
$$HC' = AC' - AH = AC\,(1 - \cos b).$$

Dado que $DB' = HC'$,

$$AB\,(1 - \cos a) = AC\,(1 - \cos b)$$

y, por consiguiente,

$$\frac{AC}{AB} = \frac{(1 - \cos a)}{(1 - \cos b)}$$

Transformando las expresiones $1 - \cos a$ y $1 - \cos b$ obtenemos la expresión siguiente:

$$\frac{AC}{AB} = \frac{1 - \cos a}{1 - \cos b} = \left(\frac{sen\,\frac{a}{2}}{\cos\frac{b}{2}} \right)^2$$

Pero en nuestro caso AC es menor que AB, por lo cual

$$sen\,\frac{a}{2} < sen\,\frac{b}{2}$$

Como ambos ángulos son agudos,

$$a < b$$

De modo que el hilo del péndulo (y la cuerda del columpio) debe desviarse de la posición vertical en una magnitud mayor que la vez anterior. Este efecto se observa cuando una persona, meciéndose en el columpio, se yergue mientras la tabla asciende.

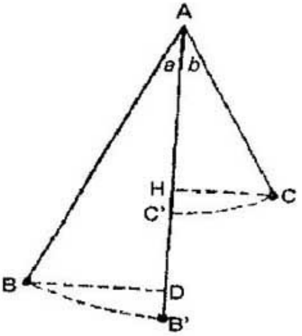
Ahora vamos a analizar el movimiento inverso del columpio, o sea, el trayecto del peso desde el punto extremo superior hasta su posición inferior, teniendo en cuenta que en este caso la longitud del péndulo aumenta: el peso desciende del punto C al G. Cuando el péndulo se desvía de la posición AG y pasa a ocupar la posición AG', el peso, que desciende en HG', acumula cierta reserva de energía potencial, la cual deberá elevarlo seguidamente a la misma altura en la parte restante de la trayectoria. Pero pasando a la posición AG' el peso se eleva de G' a K, por tanto, acto seguido, el hilo se desviará a un ángulo c, mayor que b, por la causa que hemos examinado anteriormente. Así pues,

$$c > b > a$$

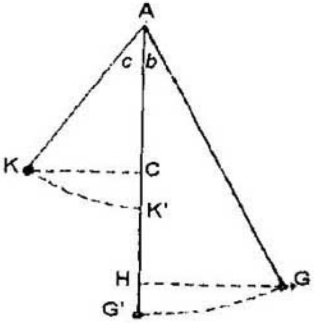
Cuando se aplica el procedimiento descrito, el ángulo de desviación del hilo del péndulo y, por tanto, de las cuerdas del columpio, aumenta en cada oscilación y puede elevarse paulatinamente hasta la magnitud que se desee.

Realizando esta maniobra a la inversa, se puede frenar el movimiento del columpio y aun detenerlo.

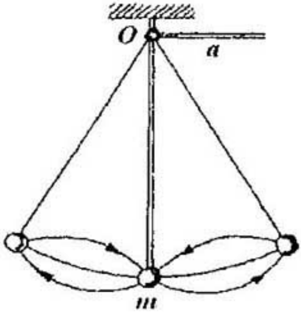
En su obra Física teórica A. Eijenvald describe un experimento bastante sencillo que permite comprobar este hecho sin valerse del columpio. Para ello hay que "suspender una carga m de un hilo que pasa por un anillo fijo O. El extremo a puede desplazarse a ambos lados cambiando periódicamente la longitud del péndulo OM. Si el extremo a se mueve con una frecuencia dos veces mayor que la de oscilaciones del péndulo, eligiendo adecuadamente la fase de desplazamiento se puede lograr que el dispositivo se balancee con la amplitud requerida".



movimiento directo del columpio



movimiento inverso del columpio



Modelo de columpio. Tomado del curso de Física Teórica de A. Einstein.

53. La atracción entre los objetos terrestres y los cuerpos celestes

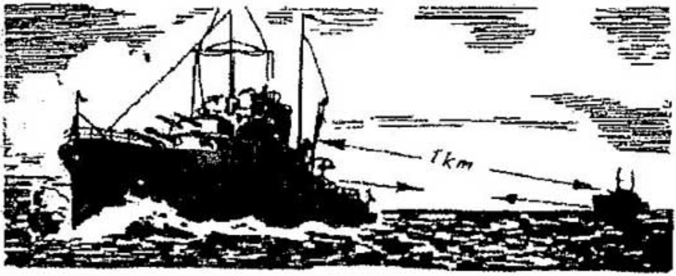
La masa de los cuerpos celestes multiplica muchas veces la de los objetos terrestres. Además, las distancias entre ellos son un sinfín de veces mayores que las que separan los cuerpos terrestres. Como la fuerza de atracción es directamente proporcional al producto de sus masas, pero es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos ¿por qué, pues, no advertimos la atracción recíproca de los cuerpos terrestres? Y ¿por qué ésta no es tan notoria en el Universo? Explíquelo.

Indudablemente, las enormes distancias que separan los cuerpos celestes deberían atenuar su atracción recíproca. Pero si las distancias espaciales son enormes, las masas de los cuerpos celestes son increíbles. Solemos subestimarlas, mientras que los cuerpos celestes de tamaño de satélites de Marte o asteroides "pequeños" poseen masas inverosímiles.

El asteroide más "chico" de los que se conocen, tiene un volumen de 10 a 15 km^3. Cuesta trabajo suponer, aunque sea aproximadamente, qué masa tendrá 1 km^3 de sustancia de la misma densidad que el agua. Hagamos el cálculo. Un kilómetro cúbico equivale a $(10)^{15}$ cm^3; semejante cantidad de agua tiene una masa de 10^{15} g., es decir, de 10^9 t.

¡Mil millones de toneladas! Mas, en realidad los cuerpos celestes constan de cientos o miles de millones de kilómetros cúbicos de materia que a veces es mucho más densa que el agua. La fuerza de atracción que depende del producto de masas tan colosales no se atenúa hasta valores ínfimos por las enormes distancias que median de unos cuerpos a otros.

La Tierra y la Luna se atraen con una fuerza de 2×10^{20} N, en tanto que dos personas que están alejadas a 1 m. una de otra lo hacen con una fuerza de $3 \cdot 10^{-7}$ N, y dos navíos de línea que distan 1 km. uno de otro, con una fuerza de 0,04 N.



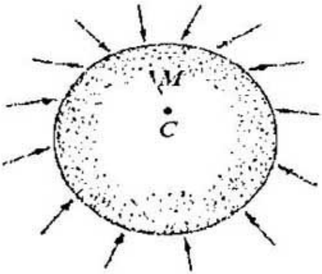
Dos buques de línea de 20.000 t. cada uno, dispuestos a una distancia de 1 km. uno de otro, se atraen con una fuerza de 0,04 N.

Por cierto, semejantes fuerzas son incapaces de vencer la resistencia de los pies de una persona contra el apoyo ni la que el agua opone al avance del buque. Por eso, a consecuencia de la gravitación se atraen mutuamente los astros y los mundos, lo cual no se advierte en la interacción de los cuerpos que se hallan en la superficie terrestre.

54. La dirección de la plomada

Se considera que todas las plomadas situadas cerca de la superficie terrestre están dirigidas hacia el centro del Globo (si se desprecia la desviación poco considerable provocada por la rotación del planeta). Consta que los cuerpos terrestres son atraídos no solo por la Tierra, sino también por la Luna. Por eso, al parecer, los cuerpos no deberían caer hacia el *centro del Globo, sino hacia el centro común de masas del planeta y su satélite. Dicho centro común de masas no coincide con el centro geométrico del globo terráqueo, sino que dista de él a 4800 km.*

En efecto, la masa de la Luna es 80 veces menor que la de la Tierra; por consiguiente, el centro común de masas está 80 veces más próximo al centro de la Tierra que al de su satélite natural. La distancia entre los centros de ambos cuerpos equivale a 60 radios terrestres, por ende, su centro común de masas dista del centro del Globo tres cuartos del radio terrestre. Si esto es cierto, la dirección de las plomadas en el globo terráqueo debe desviarse de la dirección hacia el centro de la Tierra. ¿Por qué, pues, en realidad no se observan tales desviaciones?



¿Hacia qué punto deben caer los cuerpos situados en la superficie terrestre?

El razonamiento expuesto al comienzo del problema es erróneo, aunque el error no salta a la vista. No obstante, se descubre fácilmente si lo dicho acerca de la Tierra y la Luna se refiere al Sol y la Tierra. En tal caso se razonaría de la manera siguiente.

Los cuerpos terrestres son atraídos no sólo por la Tierra, sino también por el Sol, y deberían caer hacia el centro común de masas de estos dos cuerpos. Dicho punto está localizado dentro del Astro Rey (pues la masa de este último multiplica por 300.000 la de nuestro planeta, mientras que la distancia entre sus centros es unas doscientas veces mayor que el radio solar). Por lo tanto, ¡resulta que todas las plomadas que hay en el globo terráqueo deberían estar dirigidas hacia... el Sol!

La absurdidad manifiesta de semejante conclusión facilita la búsqueda del error que se deslizó en los razonamientos. Consta que el Sol atrae todos los cuerpos terrestres y, claro está, también atrae todo el Globo Las aceleraciones que el Sol comunica a cada gramo de sustancia del planeta y a cada gramo de materia de todo cuerpo situado en la superficie de este último, son iguales. La Tierra y los objetos que se encuentran en ella, bajo la atracción solar, deben desplazarse de manera idéntica hacia el Astro Rey; en otras palabras, deben permanecer en reposo relativo. De este hecho se deduce que la atracción ejercida por el Sol no puede influir en la caída de los cuerpos terrestres: ellos deberán precipitarse a la Tierra como si el Sol no los atrajera.

Lo dicho también se refiere al sistema Tierra-Luna. No sólo en el sentido de que los cuerpos lunares no deben caer a la Tierra, sino también en el sentido de que todos los cuerpos terrestres deben precipitarse al centro del planeta, como si el satélite no los atrajera. Por cierto, este último obliga a todos los cuerpos terrestres a desplazarse hacia él, mas, al mismo tiempo todo el globo terrestre experimenta atracción de la misma magnitud. Por ello, la atracción lunar no puede influir de modo alguno sobre la caída de los cuerpos hacia la Tierra: ésta y los cuerpos situados en ella se atraen mutuamente como si la Luna no existiera. (Cabe señalar que el error que se cometió al razonar, es uno de los más frecuentes y lleva aparejada toda una serie de conclusiones equivocadas.)

Capítulo Segundo

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

55. El agua y el aire
56. El líquido más ligero
57. El problema de Arquímedes
58. La compresibilidad del agua
59. Disparando al agua
60. Una bombilla eléctrica debajo de un vehículo
61. Dos cilindros flotando en el mercurio
62. Inmersión en la arena movediza
63. Forma esférica del líquido
64. Una gota de agua
65. La elevación capilar
66. En un tubo inclinado
67. Gotas en movimiento
68. Una lámina colocada en el fondo de un recipiente con líquido
69. Ausencia de tensión superficial
70. La tensión superficial
71. El grifo
72. La velocidad de salida
73. El problema de la bañera
74. Vórtices en el agua
75. La riada y el estiaje
76. El oleaje
77. El problema de Colladon

55. El agua y el aire

¿Qué pesa más, la atmósfera del globo terráqueo o toda el agua que hay en él? ¿Cuántas veces?

Un cálculo bastante sencillo permite determinar grosso modo la razón de la masa de la atmósfera con respecto a la de toda la reserva de agua de nuestro planeta. El peso de la atmósfera equivale al de una capa de agua de unos 10 m. (0,01 km.) de espesor, que cubre uniformemente toda la superficie del Globo. Si el radio de la Tierra es R km., la masa de aire que la rodea (medida en miles de millones de toneladas) ha de ser igual a

$$4\pi R^2 \times 0.01 = 0.04\pi R^2$$

Los océanos, midiendo 4 km. de profundidad por término medio, ocupan los 3/4 de la superficie terrestre. De modo que la masa del agua de todos ellos es igual (en miles de millones de toneladas) a

$$\frac{3}{4} \times 4\pi R^2 \times 4 = 12\pi R^2$$

La razón incógnita equivale a

$$12\pi R^2 : 0.04\pi R^2 = 300$$

Así pues, toda el agua que hay en el Globo pesa unas 300 veces más que todo el aire (más exactamente, 270 veces más).

56. El líquido más ligero

Indíquese el líquido más ligero.

Entre los líquidos el que menor densidad tiene es el hidrógeno licuado: 0,07 g/cm³; éste es catorce veces más ligero que el agua, o sea, aproximadamente tantas veces como el agua es más ligera que el mercurio. Entre los líquidos en el segundo lugar está el helio licuado cuya densidad es de 0,15 g/cm³.

57. El problema de Arquímedes

Se conocen varias versiones del problema de la corona de oro. Vitruvio, arquitecto de la antigua Grecia (siglo I a.C.), la refiere de la manera siguiente:

"Cuando Hierón II[7] *llegó al poder, decidió donar una corona de oro a un templo en agradecimiento por los hechos venturosos; ordenó fabricarla a un orífice y le entregó el material necesario. El maestro cumplió el encargo para el día fijado. El rey estuvo muy satisfecho: la obra pesaba justamente lo mismo que el material que había sido entregado al orfebre. Pero poco tiempo después el soberano se enteró de que este último había robado cierta parte del oro sustituyéndolo con plata. Hierón montó en cólera y pidió a Arquimedes que inventara algún método para descubrir el engaño.*

Pensando en este problema, el sabio fue a las termas y, una vez en la bañera, echo de ver que se desbordó cierta cantidad de agua, correspondiente a la profundidad a la que se hundió su cuerpo. Al descubrir de esa manera la causa del fenómeno, no siguió en las termas, sino que se lanzó a la calle, *rebosante de alegría y en cueros, y corrió hasta su casa exclamando en alta voz: "¡Eureka!, ¡eureka!" (hallé).*

Cuando llegó a su casa, Arquímedes tomo dos pedazos del mismo peso que la corona, uno de oro y otro de plata, llenó con agua un recipiente hasta los bordes y colocó en él el lingote de plata.

Acto seguido lo sacó y echó en el recipiente la misma cantidad de agua que se desbordó, midiéndola previamente, hasta llenarlo. De esta manera determinó el peso del trozo de plata que correspondía a cierto volumen de agua. A continuación realizó la misma operación con el trozo de oro y volviendo a añadir la cantidad de agua desbordada, concluyó que esta vez se derramó menos líquido en una cantidad equivalente a la diferencia de los volúmenes de los trozos de oro y plata de pesos iguales.

Después volvió a llenar el recipiente, colocó en él la corona y se dio cuenta de que se derramó una mayor cantidad de agua que al colocar el lingote de oro: partiendo de este exceso de líquido Arquímedes calculó el contenido de impurezas de plata, descubriendo de esa manera el engaño."

¿Se podría determinar la cantidad de oro sustituida por plata en la corona, utilizando el método de Arquímedes?

Según los datos disponibles, Arquímedes tenía derecho a afirmar que la corona no era de oro puro. No obstante, el siracusano no supo determinar con exactitud qué cantidad de oro había hurtado el orífice. La habría determinado si el volumen de la aleación de oro y plata fuera justamente igual a la suma de volúmenes de sus componentes. La leyenda atribuye a Arquímedes precisamente este criterio, compartido, por lo visto, por la mayoría de los autores de libros de texto escolares.

De hecho, sólo muy pocas aleaciones tienen esa propiedad. Por lo que atañe al volumen de la aleación de oro y plata, éste es menor que la suma de volúmenes de los componentes. En otras palabras, la densidad de semejante liga supera la que se obtiene por cálculo ateniéndose a las reglas de adición simple. Es fácil ver que al calcular la cantidad de oro hurtado en base a su experimento, Arquimedes debería obtener un resultado menor: a su modo de ver, la densidad más elevada de la aleación probaba que en ella era mayor la cantidad de oro. Por este motivo no pudo determinar exactamente la cantidad de oro con la cual se había quedado el estafador.

¿Cómo se debería resolver el problema planteado? "Actualmente señala el Prof. Menshutkin en su Curso de Química General, procederíamos del modo siguiente: Determinaríamos no sólo la densidad del oro y plata puros, sino también la de toda una serie de aleaciones de oro y plata cuya composición se conoce con exactitud. A continuación trazaríamos un diagrama a base de los datos obtenidos; éste nos proporcionaría la curva de variación de la densidad de las aleaciones de oro y plata dependiendo del contenido de componentes. En el caso dado se obtendría una recta, pues la densidad varía linealmente en base a la composición de la liga. Al determinar la densidad de la corona, señalaríamos el resultado obtenido en la curva de densidad del sistema oro-plata y definiríamos a qué composición de la aleación corresponde este dato, averiguando así la composición del metal de la corona."

El caso sería distinto si parte del oro fuera sustituida con cobre y no con plata: el volumen de la aleación de oro y cobre vale exactamente la suma de volúmenes de sus componentes. En este caso el método de Arquímedes proporciona un resultado muy exacto.

58. La compresibilidad del agua

¿Qué sustancia, el agua o el plomo, se comprime más bajo presión?

En los libros de texto escolares se subraya con tanta tenacidad la incompresibilidad de los líquidos que se inculca la idea de que realmente lo son, al menos en un grado menor que los sólidos. Pero de hecho el término "incompresibilidad" aplicado a los líquidos no es sino una expresión figurada para definir su insignificante reducción de volumen al ser presionados, además, éstos se comparan sólo con los gases. Si comparamos los líquidos y los sólidos en cuanto a la compresibilidad, resultará que los primeros son muchas veces más compresibles que los segundos.

El metal más compresible – el plomo – expuesto a la acción de una carga omnilateral, disminuye su volumen en 0,000006 del inicial bajo la presión de 1 at. El agua, en cambio, es unas ocho veces más compresible: su volumen disminuye en 0,00005 al aplicar la misma presión. Pero en comparación con el acero, este líquido se estrecha unas 70 veces más 1.

El ácido nítrico se distingue entre los líquidos por su elevada capacidad de compresión reduciendo su volumen inicial en 0,00034 a la presión de 1 at., es decir, al ser presionado reduce su volumen unas 500 veces más que el acero. Sin embargo, la compresibilidad de los líquidos es decenas de veces menor que la de los gases.

59. Disparando al agua

Una caja abierta, con paredes de madera contrachapada parafinadas por dentro, de unos 20 cm. de largo y 10 cm. de *ancho, contiene agua hasta un nivel de 10 cm. respecto a su fondo. Si se dispara contra la caja, se hace añicos, mientras que el agua se dispersa en forma de polvo finísimo.*

¿Cómo se explicaría esta acción del impacto de bala?

Este fenómeno se atribuye a la compresibilidad insignificante de los líquidos y, además, a su elasticidad absoluta. La bala entra en el agua con tanta rapidez que su nivel no tiene tiempo para subir. Por tanto, el líquido se contrae instantáneamente en la magnitud del volumen del proyectil.

La alta presión que se crea en este caso destroza las paredes del recipiente y pulveriza el agua que éste contiene. Una estimación simple proporciona cierta noción acerca de la magnitud de la presión. La caja contiene $20 \times 10 \times 10 = 2000$ cm^3 de agua. El volumen de la bala es de 1 cm^3. El líquido deberá comprimirse en 1/2000 parte, o sea, en 0,0005 de su volumen inicial. A la presión de 1 at. el mismo reduce su volumen en 0,00005, es decir, diez veces menos. Por consiguiente, cuando disminuye el volumen del líquido contenido en la caja, su presión deberá elevarse hasta 10 at.; a esta magnitud asciende, aproximadamente, la presión de trabajo que se crea en el cilindro de una máquina de vapor. Es fácil calcular que cada una de las paredes y el fondo de la caja sufrirán la acción de una fuerza de 10.000 a 20.000 N.

Este hecho explica los enormes efectos destructivos que producen los obuses explotados bajo agua. "Si un obús explota aunque sea a 50 m. de un submarino, pero a suficiente profundidad para que la fuerza explosiva no "se disipe" por la superficie del agua, el buque se destruye inminentemente" (R.A. Millikan).

60. Una bombilla eléctrica resistiendo el peso de un vehículo

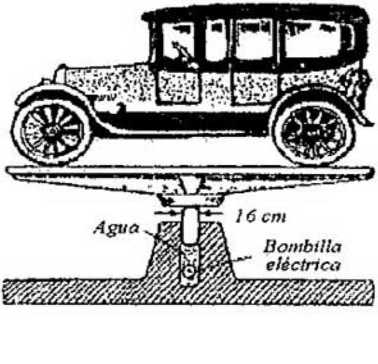
¿Puede una bombilla soportar una presión de media tonelada? El diámetro del émbolo es de 16 cm.

Calculemos la presión que experimentan las paredes de la bombilla. La sección del émbolo es

$$S = \frac{\pi}{4} \times 16^2 = 201 cm^2$$

Como el peso del vehículo es de 5000 N, a cada centímetro cuadrado de la superficie corresponderá la presión siguiente:

$$5000 : 201 \approx 25\ N/cm^2$$



Las bombillas ordinarias suelen resistir una presión más alta, de hasta 27 N/cm². Por eso, si se cumplen las condiciones indicadas al plantear el problema, la ampolla quedará intacta.

Este problema tiene importancia práctica en los trabajos que se llevan a cabo bajo agua. Una bombilla corriente, que resiste una presión de 2,7 at., puede ser utilizada a una profundidad de hasta 27 m. (a profundidades mayores se emplean bombillas especiales).

61. Dos cilindros flotando en el mercurio

Dos cilindros de masas y diámetros iguales, uno de aluminio y otro de plomo, se mantienen en el mercurio en posición vertical. ¿Cuál de ellos está hundido a mayor profundidad?

No piense que el quid del problema radica en la posición vertical de los cilindros: parecería que un cuerpo de forma cilíndrica no podría sostenerse verticalmente en el seno de un líquido, sino que tendría que ponerse de costado. Esta afirmación no es cierta: si un cilindro tiene diámetro suficientemente grande en comparación con su altura, puede flotar en posición estable.

De por sí, este problema no es difícil, pero a veces se suele razonar de forma equivocada al abordarlo. El cilindro de aluminio es cuatro veces más largo que el de plomo, de la misma masa y diámetro. Por eso podemos considerar que estando suspendido en posición vertical en el mercurio, deberá hundirse más que el de plomo. Por otra parte, este último, siendo más pesado, debería sumergirse más que el de aluminio que es más ligero.

Estas dos suposiciones son equivocadas: ambos sólidos están sumergidos a una misma profundidad. La causa de ello está a la vista: dado que tienen peso idéntico, deben desplazar iguales cantidades de líquido con arreglo al principio de

Arquímedes; mas, como tienen diámetros iguales, la longitud de sus partes sumergidas también debe ser igual, pues en otro caso no desalojarían la misma cantidad de líquido.

Sería interesante saber, cuántas veces mayor será la parte del cilindro de aluminio que sobresale del azogue en comparación con la correspondiente del de plomo. Es fácil calcular que este último deberá sobresalir en 0,17 de su longitud, en tanto que el otro, en 0,8. Como el cilindro de aluminio es 4,2 veces más largo, las 0,8 de su longitud serán

$$\frac{0.8 \times 4.2}{0.17} \approx 20$$

mayores que las 0,17 de la del otro.

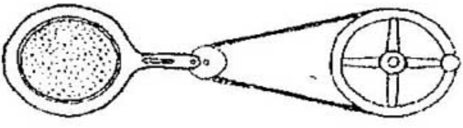
Así pues, la parte del cilindro de aluminio asomada del mercurio será veinte veces más larga que la respectiva parte del de plomo.

El ejercicio que acabamos de analizar tiene importancia en la teoría que pretende explicar la estructura del globo terráqueo, a saber, en la llamada teoría de isostasia. Ésta arranca del hecho de que las partes sólidas de la corteza terrestre son más ligeras que las masas plásticas subyacentes, por lo cual flotan a flor de estas últimas. Dicha teoría considera la corteza terrestre como un conjunto de prismas de sección y peso iguales, pero de diferente altura. Según ella, sus partes elevadas deben de corresponder a prismas de menor densidad, y las menos elevadas, a prismas de densidad mayor. Es evidente que, según nos hemos dado cuenta al resolver el problema, las elevaciones que se aprecian en la superficie terrestre, siempre corresponden a defectos de masas bajo tierra, y las depresiones, a sus excesos. Las mediciones geodésicas corroboran esta tesis.

62. Inmersión en la arena movediza

¿Será aplicable a los áridos el principio de Arquímedes? ¿A qué profundidad se hundirá en la arena seca una bola de madera colocada en su superficie? ¿Podría hundirse en la arena movediza una persona?

No se puede aplicar en forma directa el principio de Arquímedes a los áridos, puesto que las partículas que los forman, experimentan rozamiento que es ínfimo en los líquidos. No obstante, si la libertad de desplazamiento de las partículas de áridos no está limitada por su rozamiento recíproco, el referido principio se podrá aplicar. Por ejemplo, en semejante estado se encuentra la arena seca que se sacude reiteradamente; en este caso sus granos se desplazan sujetos a la fuerza de la gravedad.



Dispositivo para sacudir la arena.

Ya R. Hooke, famoso contemporáneo y compatriota de Isaac Newton, decía al respecto lo siguiente:

"Es imposible mantener bajo arena (que es sacudida ininterrumpidamente) un cuerpo ligero, por ejemplo, un trozo de corcho: éste "emergerá" enseguida a flor del árido, mientras que un cuerpo pesado, por el contrario, empezará a hundirse y al fin y al cabo alcanzará el fondo del recipiente"

Posteriormente, H. Bragg, eminente físico inglés, realizó estas experiencias valiéndose de una centrifugadora especial.

Se puede predecir el comportamiento de una bola dispuesta sobre la superficie de arena inmóvil recordando los razonamientos que en su tiempo permitieron a S. Stevin a deducir el principio de Arquímedes.

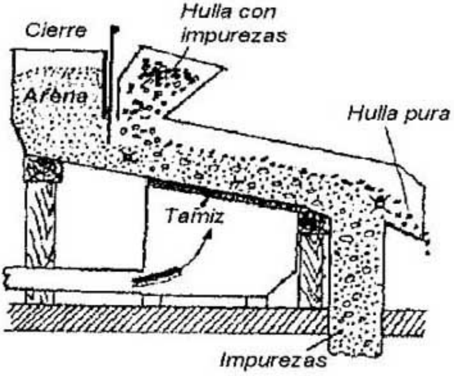
Esta figurilla ligera, con un peso sujetado a los pies, presa en la arena, se asoma al poner a funcionar la sacudidora.

Primero advirtamos que la llamada "densidad aparente" de la arena (o sea, la masa de un centímetro cúbico de este árido junto con los espacios de aire) es igual, en el caso de la arena de grano fino, a 1,7 g., es decir, supera tres veces la de la madera

Separemos, aunque sea mentalmente, una bola de árido dentro de un montón de arena, de volumen geométrico igual al de la referida bola de madera. Esta última se mantiene en equilibrio merced a la acción de dos fuerzas diferentes: 1) el rozamiento de los granos de arena unos contra otros y 2) el peso de la capa de este árido dispuesta encima, que ejerce presión hacia los lados, empujando de esta manera nuestra bola de arena por abajo. La resultante de todas las fuerzas no debe ser menor que el peso de dicha bola. Si la sustituimos –también mentalmente– por otra más ligera, de madera, la presión que ésta sufrirá por abajo será mayor que su peso propio. Es evidente que bajo la acción de la fuerza de la gravedad nuestra bola imaginaria no podrá hundirse a tanta profundidad.

El nivel máximo al que se hundirá la bola en la arena no deberá ser mayor que la profundidad en que su peso equivalga al de la arena "contenida" en su parte hundida. Mas, esto no quiere decir en absoluto que llegará precisamente hasta ese nivel: sólo indicamos la profundidad límite de hundimiento en el árido bajo la acción de su peso. Esto tampoco quiere decir que la bola presa en el montón de arena por debajo del nivel límite, aparecerá por sí misma en la superficie: se lo impedirá el rozamiento.

Así pues, el principio de Arquímedes es aplicable a los materiales áridos, pero con rigurosas reservas que no tendrán validez cuando dichos cuerpos sufran sacudidas o vibración; en el caso que estamos analizando los áridos que sufren sacudidas, semejan líquidos. En lo que se refiere a los que están en reposo, el principio de Arquímedes tan sólo afirma que un sólido de peso específico considerable, situado en la superficie de un árido, puede hundirse por su propio peso a una profundidad no mayor a aquella en que su peso sería igual al



de la cantidad correspondiente del árido que se contendría en la parte hundida del objeto en cuestión

Por cierto, esto permite sacar la conclusión de que, como el peso específico medio del cuerpo humano es menor que el de la arena seca, una persona no puede ser tragada por la arena movediza. En semejante caso, mientras menos se mueva ella, menor será la profundidad a que se hundirá: la agitación sólo precipita el hundimiento.

La posibilidad de aplicar el principio de Arquímedes al caso de la arena se aprovecha en la técnica para separar las impurezas contenidas en la hulla. La hulla húmeda, que debe ser purificada, se echa sobre una capa de arena cuyo peso específico supera el de este combustible, pero es menor que el de la ganga a separar. Para agitar los granos de arena, se bombea aire a través de ella, de abajo arriba e ininterrumpidamente, que pasa por un tamiz sobre el cual está la arena. Su presión, es decir, la velocidad del flujo de aire, determina el peso específico del árido.

Al tomar contacto con la superficie de arena, los fragmentos de hulla y las impurezas se separan: el carbón se acumula en la superficie, mientras que la ganga se hunde en la arena, pasa por el tamiz y se acumula en un recipiente. La figura muestra la estructura de semejante equipo.

63. El líquido adopta forma esférica

¿Cómo se podría demostrar el hecho de que en estado de ingravidez los líquidos tienen forma esférica?

La propiedad del líquido en ingravidez de adoptar forma esférica se demuestra evidentemente en el famoso experimento de Plateau: una porción de aceite de oliva mezclada en una disolución hidroalcohólica, de la misma densidad, se agrupa en forma de bola. Pero es imposible averiguar si esta forma esférica es geométricamente exacta o no. Por ello, el experimento de Plateau comprueba grosso modo la tesis que nos interesa. Este hecho se demuestra mediante el fenómeno del iris.

La teoría del arco iris afirma que una desviación, por muy insignificante que sea, de la forma de las gotas de lluvia respecto de la esférica geométricamente estricta debe de reflejarse en la forma del iris, si la diferencia es considerable, éste puede no aparecer en absoluto. Como una gota es imponderable mientras cae libremente (ver ej. 50), este hecho nos proporciona la demostración que necesitamos.

64. La gota de agua

¿En qué caso las gotas de agua que caen del grifo de un samovar son más pesadas, cuando el agua está fría o caliente?

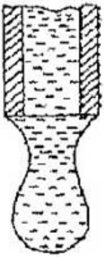
El peso de la gota depende de la magnitud de la tensión superficial del líquido: ella se desprende cuando su peso es suficiente para romper la película superficial en su "cuello".

Si el radio de éste es r, y el coeficiente de tensión superficial es a (N/m), la gota se desprenderá con

$$2\pi r\sigma = mg$$

por lo que su masa será

$$m = \frac{2\pi r\sigma}{g}$$



Cuanto mayor es la tensión superficial, tanto mayor es el peso de la gota. Pero consta que al elevarse la temperatura, se reduce la tensión superficial: en el caso del agua disminuye en el 0,23 % por cada grado centígrado. A los 100° C la tensión superficial del agua se reduce en el 23 % en comparación con la magnitud correspondiente a 0° C, mientras que a los 20° C es menor en un 4,6 % que a 0° C. Por consiguiente, al bajar la temperatura del agua contenida en el samovar de 100° C hasta la temperatura ambiente (20° C), el peso de las gotas de agua deberá elevarse en

$$\frac{95.4 - 77}{77} = 0.24$$

o sea, en el 24 %, es decir, aumentará notablemente.

65. La elevación capilar

a) *¿A qué altura debe subir el agua contenida en un tubo de vidrio de diámetro interior de 1 micra?*

b) ¿Qué líquido se elevaría a la mayor altura en semejante tubo?

c) ¿Qué agua -caliente o fría- se eleva a la mayor altura por un tubo capilar?

a) Con arreglo a la ley de Borelli, también denominada muy a menudo "ley de Jurin", la altura a que se eleva el líquido que moja las paredes del tubo, es inversamente proporcional a su diámetro. En uno de vidrio de diámetro interior de 1 mm. el nivel de agua se elevará a 15 mm. Por ello, en un tubo de diámetro interior de 1 micra su altura será 1000 veces mayor, o sea, ¡de 15 metros!

b) Subiendo por el tubo capilar, el potasio fundido (funde a 63° C) deja atrás a los demás líquidos: en un tubo de vidrio de diámetro interior de 1 mm. subirá a 10 cm.; si el diámetro del canal es de 1 micra, se elevará a

$$10 \text{ cm.} \times 1000 = 100 \text{ m.}$$

c) En un tubo del diámetro indicado el líquido subirá tanto más cuanto mayor sea su tensión superficial y menor sea su densidad. Esta dependencia se expresa por medio de la fórmula siguiente:

$$\rho g h = \frac{2\sigma}{r}$$

donde h es la altura de elevación, σ, el coeficiente de tensión superficial, r, el radio interior del tubo y ρ, la densidad del líquido. Con el aumento de la temperatura la tensión superficial disminuye mucho más rápido que la densidad ρ, a consecuencia de lo cual la altura h debe reducirse: un líquido caliente subirá por el tubo capilar a menor altura que otro frío.

66. En un tubo inclinado

El agua sube por un tubo capilar inclinado a 10 cm. sobre el nivel del agua contenida en un recipiente. ¿A qué altura se elevará este líquido si el tubo se inclina a 30° respecto a su superficie?

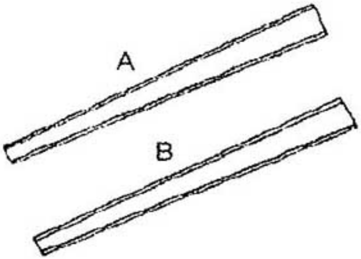
La altura a la que se eleva un líquido contenido en un tubo capilar no depende de la posición, sea inclinada o vertical, de este último. En todos los casos la elevación, es decir, la distancia del menisco a la superficie del líquido, medida sobre la vertical, será la misma. En el caso descrito el "hilo" de líquido que sube por el tubo inclinado a 30° será dos veces más largo que con la posición vertical de éste, pero la altura del menisco sobre el nivel del líquido contenido en el recipiente será la misma.

67. Las gotas en movimiento

Tenemos dos tubos de vidrio delgados y abocinados por un extremo. En el primero, junto al punto A se encuentra una *gota de mercurio, y en el segundo, junto al punto B, una de agua.*

Además, las gotas no están en reposo, sino que se mueven por sus respectivos tubos. ¿Por qué sucede esto?

¿En qué sentido se mueven las gotas, hacia el extremo ancho o hacia el estrecho?

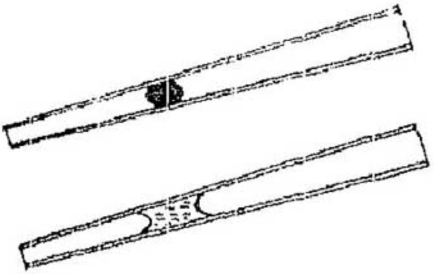


La columna de mercurio que se encuentra en el tubo de vidrio tiene convexos ambos extremos, puesto que este líquido no moja el cristal. La superficie que da al extremo derecho, tiene un radio de curvatura menor que la opuesta; por eso ejerce mayor presión sobre el mercurio (problema 65), empujándolo hacia el extremo abocinado.

La columna de agua, que moja el cristal, está acotada por meniscos cóncavos por ambos lados, además, el de la parte estrecha es menos cóncavo que el otro. El menisco curvo arrastra el líquido con mayor fuerza, por eso la columna de agua se desplaza hacia la parte angosta del tubo.

Así, pues, cada una de las columnas de líquido se desplaza por su respectivo tubo en sentidos opuestos: la de mercurio, hacia el extremo ancho, y la de agua, hacia el estrecho.

La capacidad del agua de pasar –por sí misma– por los canales capilares de tubos anchos a estrechos tiene mucha importancia para la conservación de la humedad en el suelo. "Si la capa superior del suelo está compacta, es decir, tiene canalitos estrechos, mientras que las inferiores están porosas, o sea, tienen muchísimos canalitos más anchos, entonces –afirma el agrónomo A. Dudinski– el agua pasa fácilmente de la capa inferior a la superior. Pero si, por el contrario, la capa inferior está compacta, en tanto que la superior está porosa, esta última, al secarse, ya no podrá absorber agua procedente de la capa inferior (puesto que el agua no pasa de canalitos estrechos a anchos, sino que sólo lo hace a la inversa) y, por tanto, seguirá siendo seca."



La columna de mercurio (arriba) se desplaza hacia el extremo abocinado del tubo, mientras que la del agua (abajo) se corre hacia el estrecho. Esta última propiedad del agua permite disminuir el perjuicio que causan las sequías.

En esto consiste uno de los métodos utilizados para atenuar la acción perjudicial de las sequías, consistente en el esponjamiento del suelo: "para conservar humedad en el suelo, hay que esponjar, con la mayor frecuencia posible, su capa superior, hasta unos dos centímetros de profundidad e incluso menos; en este caso los canalitos estrechos formados en ella se destruyen y sustituyen por otros, más anchos, que no pueden succionar agua de la capa subyacente. La capa superior porosa se vuelve seca, pero ya no puede absorber agua de los canalitos más estrechos de la capa inferior del suelo ni la puede conducir hasta la superficie, protegiendo de esa manera el resto del suelo contra la desecación por la acción del viento y los rayos solares."

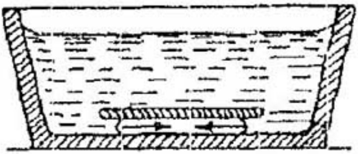
Éste es uno de los ejemplos aleccionadores de la importancia que tiene este fenómeno físico que a primera vista parece ser tan insignificante.

68. Una lámina colocada en el fondo de un recipiente con líquido

Si en el fondo de un recipiente de vidrio lleno de agua se coloca una lámina de madera bien adherida al mismo, ésta emergerá inminentemente. Pero si al fondo del mismo recipiente con mercurio se aplica una lámina de vidrio, ésta se quedará en su lugar. Consta que la flotabilidad del vidrio en el mercurio (la diferencia de densidades del mercurio y el vidrio) es mucho mayor que la de la madera en el agua.

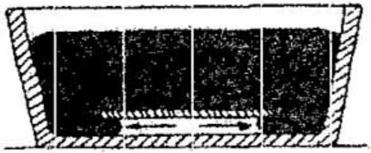
¿Por qué, pues, la lámina de madera sube a la superficie, mientras que la de vidrio en el mercurio no sube?

La lámina de madera, depositada en el fondo del recipiente con agua, tendrá que emerger, pues el líquido penetra por debajo de ella. Sólo nos queda explicar, por qué el agua se cuela por debajo de la lámina de madera, mientras que el mercurio no penetra por debajo de la de vidrio. Hay que tener en cuenta que por más que se adhiera la lámina al fondo, entre ellos siempre habrá un espacio muy pequeño. Junto a los bordes de estas dos superficies muy próximas una a otra, el agua, que moja tanto la madera como el vidrio, forma una concavidad que da hacia el espacio libre de agua; dicha concavidad, lo mismo que el menisco cóncavo, arrastra agua al espacio entre la lámina y el fondo.



El agua se cuela por debajo de la lámina aplicada al fondo del recipiente.

Es distinto el caso del mercurio y la lámina de vidrio. Este líquido no moja al vidrio, por eso entre la lámina y el fondo, ambos de vidrio, la superficie convexa del mercurio da al espacio de aire; esta convexidad presiona hacia afuera y no deja que el metal líquido se cuele por debajo de la lámina.



El mercurio no penetra por debajo de la lámina aplicada al fondo.

69. Ausencia de tensión superficial

¿A qué temperatura se anula la tensión superficial de los líquidos?

La tensión superficial del líquido desaparece del todo a la temperatura crítica: éste pierde su capacidad de formar gotas y se evapora a cualquier presión.

70. La tensión superficial

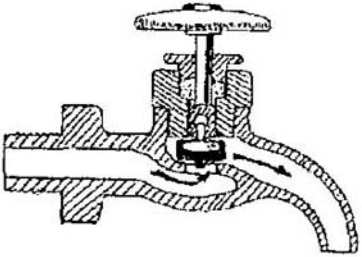
¿Qué presión ejerce, aproximadamente, la capa superficial de un líquido sobre las capas subyacentes?

A pesar de la finura extraordinaria[9] –de unos 5×10^{-8} cm.–. la película superficial de líquido ejerce enorme presión sobre la masa de líquido que ella envuelve. Para algunos líquidos esta presión es de decenas de miles de atmósferas, es decir, equivale a decenas de toneladas por centímetro cuadrado.

Semejante presión condiciona la baja compresibilidad de los líquidos que, de por sí, siempre están comprimidos con gran fuerza, por lo cual se obtiene un efecto ínfimo cuando se aumenta artificialmente en cien atmósferas una presión de decenas de miles de atmósferas existente en ellos.

71. El grifo

¿Por qué los grifos de agua corriente suelen ser giratorios, y no en forma de esclusa?



Parecería que los grifos de compuerta instalados en las cañerías de agua serían más manejables que las llaves de rosca que se emplean generalmente. Sin embargo, no se utilizan porque causarían averías de la red de aguas corrientes. Al cerrar bruscamente el grifo, es decir, al cortar repentinamente la corriente, se provocaría una fuerte sacudida de toda la red de tuberías, el llamado golpe hidráulico, o golpe de ariete, muy peligroso para este tipo de obras. El Prof. A. Deisha, autor de un libro de texto de hidráulica, compara el golpe de ariete con el choque de un tren empujado por la locomotora, contra un tope terminal:

"En este caso los topes del primer vagón que chocan con el terminal, se comprimirán por la fuerza de inercia de los vagones siguientes, hasta que todos se detengan. Acto seguido los resortes amortiguadores del delantero tenderán a extenderse empujando los demás vagones hacia atrás. La onda creada por los topes comprimidos recorrerá todo el tren, del primer vagón hasta el último. Si al final del tren está enganchada una locomotora pesada, la onda de presión reflejada por ella recorrerá todo el tren en sentido inverso, hasta el tope terminal. De modo que las oscilaciones, amortiguándose gradualmente a causa de la resistencia, se transmitirán de un extremo a otro del tren, y a la inversa. La primera onda de presión será peligrosa para los muelles de topes de todos los vagones, y no sólo del delantero. Como el agua es elástica, aunque en grado ínfimo, cuando se cierra el grifo instalado en el extremo de una tubería larga, las partículas traseras empiezan a empujar las delanteras (que ya se han detenido), creando de esa manera una presión elevada; ésta, lo mismo que una ola ordinaria, viajará a gran velocidad (un poco menor que la de propagación del sonido en el agua) por toda la tubería de cabo a rabo.

Al alcanzar el otro extremo (el tanque de presión, por ejemplo), la onda se reflejará hacia el grifo, de tal modo se producirá una serie de oscilaciones, esto son, elevaciones de presión que irán amortiguándose paulatinamente debido a la resistencia a la onda. No obstante, la primera de ellas será muy peligrosa no sólo en el extremo donde está instalado el grifo, sino también en el extremo opuesto de la conducción, próximo al tanque, puesto que podrá destruir fácilmente cualquier pieza o junta de menor resistencia. La presión de ariete que se crea en este caso, sobre todo la reflejada, põdrá superar de 60 a 100 veces la presión hidrostática normal existente en la tubería."

El golpe será tanto más fuerte y más destructor cuanto más larga sea la tubería: estropea el sistema de abastecimiento de agua, a veces hace reventar tuberías de hierro colado, ensancha las de plomo, arranca codos, etc. Para evitar este efecto perjudicial, hay que estrangular gradualmente la corriente de agua, es decir, cortarla con lentitud utilizando para ello válvulas de rosca. Cuanto más larga es la tubería, tanto más deberá durar el cierre.

La fuerza del golpe de ariete es directamente proporcional a la longitud del conducto y al tiempo durante el cual se cierra la llave cuanto menos dura el cierre, tanto más fuerte será el golpe. Se ha deducido la siguiente fórmula para calcular su intensidad: la presión del golpe equivale (en metros) a la altura de la columna de agua

$$h = 0.15\frac{vl}{t}(m)$$

donde: l, longitud del conducto (en metros) y t, el tiempo durante el cual se cierra la llave (en segundos).

Por ejemplo, si una tubería de 1000 m. de longitud, por la cual el agua circula con una velocidad de 1 m/s, se cierra en 1 s, la presión creada en ella aumentará por el efecto del golpe de ariete hasta

$$h = 0.15\frac{1\times1000}{1} = 150m.$$

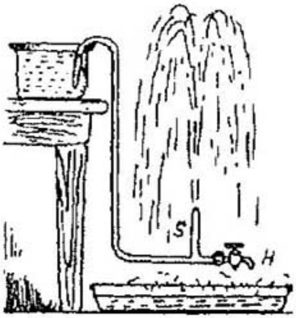
o sea, hasta 15 at.

El fenómeno de golpe de ariete se puede observar realizando un experimento mediante el dispositivo mostrado en la figura.

El agua contenida en un recipiente, sale de éste por un tubo de sifón, hecho de vidrio, corriendo verticalmente hacia abajo y luego horizontalmente. En el otro extremo del conducto está instalado un grifo de compuerta H, y a cierta distancia del extremo, un tubo corto S con un orificio pequeño que da hacia arriba.

Mientras el grifo permanece cerrado, el agua brota del conducto corto sin superar el nivel de líquido contenido en el recipiente. Mas, si la llave se abre y acto seguido se cierra bruscamente, en un primer instante el agua brotará por encima de la altura del nivel de líquido del recipiente, probando evidentemente que la presión creada en el tubo supera la hidrostática.

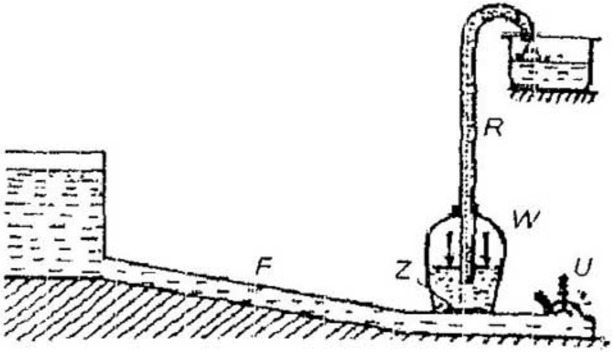
No se debe creer que en este caso se viola la ley de conservación de la energía: aquí, menor cantidad de agua se eleva a mayor altura merced al descenso de ésta desde cierto nivel, lo mismo que una carga ligera, suspendida en el extremo de una palanca, se eleva a mayor altura que otra, más pesada, colocada en el extremo opuesto.



Experimento que ilustra el golpe hidráulico.

El principio del golpe de ariete se aprovecha en una máquina simple para elevar agua, llamada ariete hidráulico, que sólo consume su energía viva.

Para ponerla en funcionamiento hay que cerrar la válvula *U*, debido a lo cual en el conducto *F* se produce un golpe hidráulico; la presión elevada del líquido abre la válvula *Z* y el aire, comprimido momentáneamente en *W*, lo impele hacia arriba. El golpe cesa, la válvula *Z* se cierra, la *U* se abre y el agua que vuelve a circular por *F*, cierra la válvula *U* y de nuevo provoca un golpe de ariete, y todo se vuelve a repetir.



Esquema de funcionamiento del ariete hidráulico.

72. La velocidad de salida

¿Qué líquido, el agua o el mercurio, tendrá la mayor velocidad de salida si son iguales sus niveles en los embudos que los contienen?

El mercurio pesa mucho más que el agua; por tanto, es probable que el primero salga más rápido que la segunda. Sin embargo, ya E. Torricelli sabía que esto no es así: la velocidad de salida no depende de ninguna manera de la densidad del líquido y se determina utilizando la fórmula de Torricelli:

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

donde v es la velocidad de salida del líquido, g, la aceleración de la gravedad y h, la altura del nivel de líquido contenido en el recipiente. Según vemos, en la fórmula no interviene la densidad del líquido.

Este principio paradójico de salida del líquido se comprende fácilmente si se considera que la fuerza que impele el líquido, es creada por la parte de éste, situada a un nivel más alto que el orificio de salida. Si el líquido es pesado, esta fuerza es mayor que en el caso del líquido ligero; pero la masa que se pone en movimiento en el primer caso es mayor, por cierto, en la misma proporción. No es de extrañar, pues, que la aceleración y, por consiguiente, la velocidad, son idénticas en ambos casos.

73. El problema de la bañera

a) Una bañera de paredes verticales se llena con agua de grifo en 8 min., y se vacía por medio del orificio de desagüe (el grifo está cerrado) en 12 min. ¿Cuánto tiempo deberá permanecer abierto el grifo para llenar completamente la pila vacía mientras está abierto el desagüe?

b) La pila se llena en 8 min.; con el grifo cerrado se tarda el r mismo lapso en vaciarla mediante el orificio de salida. ¿Qué cantidad de agua habrá en ella si durante las veinticuatro horas se vierte agua de grifo mientras el desagüe está abierto?

c) Resuélvase este mismo problema si el tiempo de llenado es 8 min., y el de vaciado, 6 min.

d) Resuélvase idéntico problema, pero llenándose a los 30 min. y vaciándose en 5 min.

e) La pila se vacía en un lapso más corto que el de llenado mediante el grifo. ¿Habrá agua en la bañera si empezamos a echar agua dejándola salir al mismo tiempo?

A continuación ofrecemos sendos pares de respuestas a las cinco preguntas planteadas: en una columna se ofrecen las respuestas correctas y en la otra, incorrectas.

a) La bañera se llenará hasta los bordes en 24 min	a) La bañera nunca se llenará hasta los bordes
b) La bañera estará vacía	b) El agua llegará hasta 1/4 de la altura de la pila.
c) No habrá agua en la pila.	c) El agua subirá hasta las 9/64 de la altura de la pila.
d) No habrá agua en la pila.	d) El agua subirá hasta 1/144 de la altura de la bañera.
e) La pila estará vacía	e) En la bañera habrá un poco de agua.

¿En qué columna, pues, están las respuestas correctas?

Las de la columna izquierda parecen ser verosímiles. Pero, en realidad, lo son las de la derecha.

Por cierto, a primera vista estas respuestas parecen ser muy extrañas; no obstante, vamos a analizar por separado cada uno de estos problemas.

a) En la bañera se vierte más agua que la que sale, sin embargo, en la columna derecha se afirma que nunca se llenará. ¿Por qué? Es que surge la idea de que es muy fácil calcular dentro de cuántos minutos el agua empezará a desbordarse. Cada minuto se llena 1/8 parte del volumen de la pila, mientras que sale 1/12; por consiguiente, el aforo por minuto es

$$\frac{1}{8}-\frac{1}{12}=\frac{1}{24}$$

parte de su capacidad. Está claro que en 24 minutos se llenará.

b) En el segundo problema el tiempo de llenado equivale al de vaciado. Por lo tanto, la cantidad de agua que ingresa cada minuto es igual a la que sale. Esto quiere decir que en la pila no deberá quedar ni una sola gota de agua, por más que dure el proceso. Sin embargo, en la columna de respuestas correctas se afirma que el nivel de agua llegará hasta un cuarto de la altura de la bañera.

c), d) y e). Es obvio que en los tres casos sale mayor cantidad de agua que entra, mas, en la segunda columna se asevera que no obstante ello en la pila se acumulará cierta cantidad de líquido.

En suma, las respuestas que damos por correctas, parecen ser absurdas. Para cerciorarse de que realmente son correctas, el lector tendrá que seguir una cadena bastante larga de razonamientos.

Empecemos por el primer problema.

a) Éste viene a ser una versión del famoso problema del depósito, que se remonta a Herón de Alejandría. Surgido hace más de dos milenios, el problema sigue figurando en muchos libros de problemas de matemáticas escolares, sin que por ello deje de ser errónea, desde el punto de vista de la física, su solución tradicional. Esta última se basa en la suposición equivocada de que el agua sale del recipiente en chorro uniforme mientras su nivel desciende.

Dicha suposición contradice la ley física que afirma que la velocidad de salida del líquido disminuye mientras desciende su nivel. Por consiguiente, es erróneo creer, como suelen hacer los escolares en las clases de matemáticas, que si la pila se vacía en 12 min., cada minuto sale una dozava parte de su contenido inicial. En realidad, el líquido sale de la manera siguiente: inicialmente, mientras su nivel es bastante alto, cada minuto sale más de una dozava parte de la pila llena; esta cantidad va disminuyendo progresivamente por instantes, y cuando su nivel es muy bajo, cada minuto sale menos de una dozava parte del contenido inicial. Por esta razón, el volumen de agua que sale durante este lapso equivale, sólo por término medio, a una dozava parte del de la pila llena, mientras que de hecho el gasto no será exactamente igual a una dozava parte, sino que un poco mayor o menor.

En general, el vaciado de la bañera se asemeja mucho a la marcha del reloj de bolsillo descrita por Mark Twain en tono de broma: el reloj marchaba bien "por término medio", al dar el número correspondiente de vueltas durante las veinticuatro horas. Mas, en la primera mitad de este tiempo adelantaba demasiado retrasándose extremadamente durante el resto de la jornada. Resolver el problema de la pila partiendo de la velocidad media de salida del agua sería lo mismo que consultar el reloj descrito por el famoso escritor estadounidense.

Según vemos, la versión simplificada de este problema, que se resuelve tan fácilmente en la escuela, hay que sustituirla por la variante real ajustándola a las leyes de la naturaleza. Obrando de esa manera obtendremos un resultado distinto. Al comenzar a llenar la bañera mientras el nivel de agua no es alto, sale menos de una dozava parte de su capacidad total; en cambio, cuando el nivel es alto, sale más de una dozava parte. Por ello, el gasto puede ser una octava parte de su volumen, y podrá igualarse con la cantidad de agua que ingresa, antes de que se llene toda la pila. A partir de este instante el nivel dejará de ascender, puesto que el agua afluente saldrá por el desagüe.

El nivel se mantendrá constante por debajo de los bordes de la bañera. Claro está que en semejantes condiciones nunca se llenará completamente. Según veremos más adelante, el cálculo matemático confirma lo que acabamos de deducir.

b) En este apartado la corrección de nuestra solución es mucho más evidente. El tiempo de llenado y de vaciado es uno mismo, 8 min. Mientras el nivel es bajo, o sea, cuando se empieza a añadir agua, cada minuto se llena una octava parte de la capacidad de la pila, y sale, según explicamos más arriba, menos de una octava parte. En resumidas cuentas, el nivel deberá elevarse hasta que el caudal afluente se iguale con el gasto. Por consiguiente, en la pila siempre habrá agua. Se puede demostrar –muy pronto lo haremos– que siendo iguales el tiempo de llenado y de vaciado, la altura del nivel real deberá equivaler a un cuarto del de la pila llena.

c), d) y e) Después de lo que acabamos de exponer no se requieren muchas aclaraciones para desvanecer las dudas en torno a nuestras respuestas a las tres preguntas restantes. En ellas, el tiempo de vaciado es menor que el de llenado. Es imposible llenar completamente la pila ateniéndose a estas condiciones, mas, se puede asegurar cierta capa de agua, aunque el flujo entrante sea exiguo.

Hay que recordar que las primeras porciones de agua que se añaden, no podrán salir con la misma rapidez, pues mientras el nivel es bajo, la velocidad de salida será muy pequeña; al descender el nivel de líquido, esta magnitud se vuelve cada vez menor que cualquier velocidad constante de llenado. Por ende, en la bañera deberá haber una capa de agua, aunque sea muy pequeña. En otras palabras, contrariamente al "sentido común", en todo tonel –por más rajado que esté– siempre habrá un poco de agua a condición de que se agregue uniforme e ininterrumpidamente la cantidad de agua correspondiente.

Ahora pasemos al examen matemático de los mismos problemas. Nos daremos cuenta de que los ejercicios elementales que se ofrecen a los escolares desde hace dos milenios, requieren conocimientos y hábitos que rebasan el marco de la aritmética elemental.

Para un recipiente de forma cilíndrica (en general, para uno de paredes verticales) vamos a establecer cierta dependencia entre el tiempo T de llenado, ídem t de vaciado y la altura l del nivel constante de líquido si el llenado se efectúa con el orificio de desagüe destapado. Para ello convengamos en utilizar las designaciones siguientes:

H, la altura del nivel de líquido en el recipiente lleno;
T, el tiempo de llenado hasta el nivel H;
t, ídem de vaciado del recipiente a partir del nivel inicial H;
S, la sección del recipiente;
c, ídem del desagüe;
w, la velocidad de descenso del nivel en el recipiente por segundo;
v, ídem de salida del líquido por segundo;
l, la altura del nivel constante mientras el orificio de

vaciado está destapado. Está claro que si en un segundo el nivel desciende en w, en el mismo lapso por el desagüe deberá salir una cantidad Swde líquido, equivalente al volumen de la columna cv del chorro que sale:

$$Sw = cv,$$

de donde

$$w = v \times c/S$$

No obstante, la velocidad v de salida del líquido se determina por la fórmula de Torricelli citada más arriba, $v = \sqrt{2gh}$, donde l es la altura del nivel y g, la aceleración de la gravedad. Por otro lado, la velocidad w de ascenso del nivel de líquido cuando el orificio está tapado, es H/T. El nivel será constante cuando la velocidad de su descenso sea igual a la de ascenso, es decir, si tiene lugar la igualdad siguiente:

$$\frac{H}{T} = \frac{c}{s}\sqrt{2gl}$$

Haciendo uso de esta fórmula hallamos la altura l del nivel estabilizado

$$l = \frac{H^2S^2}{2gT^2c^2}$$

Ésta es la altura del nivel de líquido contenido en el recipiente durante el ingreso de agua mientras el desagüe está destapado.

Simplificamos esta fórmula eliminando las variables S, c y g. El descenso del nivel de líquido en el recipiente de paredes verticales (mientras el grifo permanece cerrado) es un movimiento uniformemente variable que comienza con la velocidad w y termina con la velocidad nula. La aceleración a de semejante movimiento se determina a partir de la ecuación siguiente:

$$w^2 = 2aH$$

de donde:

$$a = \frac{w^2}{2H}$$

Si ponemos el valor de w de la expresión $w = cv/S$ y tenemos en cuenta que $v = \sqrt{2gh}$ obtenemos el resultado siguiente:

$$a = \frac{c^2v^2}{2S^2H} = \frac{c^2 \times 2gH}{2S^2H} = g\,\frac{c^2}{S^2}$$

Además, para el caso del movimiento que estamos analizando

$$H = \frac{at^2}{2} = \frac{gc^2t^2}{2S^2}$$

de donde

$$T = \frac{2HS^2}{gc^2}$$

Realizando la sustitución en la fórmula [1], obtendremos el resultado siguiente:

$$l = \frac{H^2 S^2}{2gT^2c^2} = \frac{H \times HS^2}{2T^2gc^2} = \frac{Ht^2}{4T^2}\ ;\quad \frac{l}{H} = \frac{t^2}{4T^2}$$

Así pues, para las condiciones enunciadas, el nivel de líquido contenido en el recipiente deberá mantenerse a una altura equivalente a la del recipiente lleno y se determinará mediante la fórmula que sigue:

$$\frac{l}{H} = \frac{t^2}{4T^2}$$

Ahora vamos a utilizar la fórmula deducida para resolver nuestros problemas.

a) La duración de llenado es $T = 8$ min. y el tiempo de vaciado $t = 12$ min. La altura l del nivel límite referida a la del recipiente H, equivale a

$$\frac{l}{H} = \frac{12^2}{4 \times 8^2} = \frac{9}{16}\ partes$$

El nivel de agua sólo alcanzará 9/16 partes de la altura de la bañera. Por más que se añada agua, su nivel no se elevará después.

b) En este caso $T = t = 8$ min.:

$$\frac{l}{H} = \frac{t^2}{4T^2} = \frac{1}{4}$$

El nivel ascenderá a un cuarto de la altura del recipiente.

c) Para $T = 8$ min. y $t = 6$ min.:

$$\frac{l}{H} = \frac{6^2}{4 \times 8^2} = \frac{1}{64}$$

El agua alcanzará 9/64 partes de la altura de la pila.

d) $T = 30$ min. y $t = 5$ min.:

$$\frac{l}{H} = \frac{5^2}{4 \times 30^2} = \frac{1}{144}$$

El nivel de liquido equivaldrá a 1/144 parte de la altura de la bañera

e) $t \approx T$:

$$\frac{l}{H} = \frac{t^2}{4T^2}$$

La expresión obtenida podrá ser igual a cero siempre que se observen las dos condiciones que siguen:

1) $t = 0$ y $T \neq 0$. Esto quiere decir que la bañera se vacía instantáneamente, lo cual es imposible.
2) $t \neq 0$ y $T = \infty$. Es decir, con el desagüe tapado el tiempo de llenado será indefinido. En otras palabras, la afluencia de

agua por segundo es nula, no ingresa líquido en la bañera. En la práctica este caso equivale a que la llave esté cerrada.

Así pues, siempre que el grifo esté abierto y la pila no se vacíe instantáneamente, l nunca podrá ser nula: la capa de agua siempre tendrá altura finita.

¿Bajo qué condiciones, pues, sería posible llenar toda la pila con el orificio abierto?

Evidentemente, cuando $l = H$, es decir, cuando

$$\frac{t^2}{4T^2} = 1 \Rightarrow t^2 = 4T^2 \Rightarrow t = 2T$$

Por tanto, si el tiempo de llenado es dos veces menor que el de vaciado, será posible llenarla por completo, aunque el orificio esté abierto.

También sería interesante calcular cuánto tiempo se necesitará para alcanzar un nivel constante.

Este problema no se resuelve por medio de las matemáticas elementales; habrá que valerse del cálculo integral. Ofrecemos el cálculo correspondiente a los que se interesan por esta variante; aquellos lectores que tienen conocimientos de matemáticas superiores podrán omitir el análisis que se expone a continuación, y sólo emplear la fórmula deducida al final del cálculo.

La velocidad de elevación del nivel de líquido en un recipiente al que se añade agua mientras el orificio de desagüe está destapado, se define como la diferencia entre la velocidad de ascenso del nivel con el orificio tapado (H/T) y la de descenso del mismo sin agregar líquido, ($\frac{c}{g}\sqrt{2gx}$, donde x es la altura del nivel de agua en un instante dado). Por consiguiente, la velocidad de ascenso del nivel en el momento dado será

$$\frac{dx}{dt} = \frac{H}{T} - \frac{c}{S}\sqrt{2gx}$$

de donde

$$dt = \frac{dx}{\frac{H}{T} - \frac{c}{S}\sqrt{2gx}}$$

El tiempo necesario para que el nivel de líquido suba hasta la altura $x = h$ se designa por Θ. Integrando la ecuación

$$\int_0^{\Theta} dt = \int_0^h \frac{dx}{\frac{H}{T} - \frac{c}{S}\sqrt{2gx}}$$

obtenemos la siguiente fórmula para determinar el tiempo Θ que se necesita para que el nivel de líquido alcance la altura h:

$$\Theta = -\frac{S}{gc}\left[\sqrt{2gh} + \frac{HS}{Tc}\ln\left(1 - \frac{cT}{SH}\sqrt{2gh}\right)\right]$$

(aquí, ln denota el logaritmo de base e = 2,718...).

Esta expresión puede ser simplificada. Partiendo de las igualdades $wS = vc$ y $v = \sqrt{2gh}$, se determina la velocidad w de descenso del nivel desde la altura h al vaciar la pila:

$$w = \frac{dh}{dt} = \frac{c}{S} v = \frac{c}{S}\sqrt{2gh}$$

Por consiguiente,

$$dt = \frac{S}{c\sqrt{2gh}} x \frac{dh}{\sqrt{h}} \Rightarrow \int_0 dt = \frac{S}{c\sqrt{2gh}} x \int_0^H \frac{dh}{\sqrt{h}}$$

de donde

$$t = \frac{2S}{c}\sqrt{\frac{H}{2g}}$$

Después de realizar las sustituciones correspondientes se obtiene la siguiente expresión para determinar Θ:

$$\Theta = -\left[t\sqrt{\frac{h}{H}} + \frac{t^2}{2T}\ln\left(1 - \frac{2T}{t}\sqrt{\frac{h}{H}}\right)\right]$$

la cual no contempla los casos de sección S y c del recipiente y del orificio de salida ni la aceleración de la gravedad g. Esto último señala que el tiempo de llenado de la bañera debe ser el mismo que en cualquier otro planeta.

Si deseamos averiguar cuánto tiempo se necesitará para alcanzar los niveles límites en los recipientes, llegaremos a la conclusión de que esta magnitud será indefinida, o sea, nunca se llenarán. Esta respuesta es bastante inesperada: se podría preverla, pues a medida que el nivel se aproxima a la altura límite, disminuye progresivamente su velocidad de elevación; cuanto más cerca esté el nivel de líquido a su límite, tanto menos tenderá a él. Queda claro que el agua nunca lo alcanzará, por mucho que se le acerque.

No obstante, desde el punto de vista práctico, es posible formular el problema de un modo distinto. Pues, en este caso no es obligatorio que el nivel de agua coincida exactamente con el límite; por ejemplo, pueden diferir en 0,01 de altura. El tiempo que se necesita para que el agua alcance este nivel "aproximado" se determina mediante la fórmula deducida poniendo $h = 0{,}99l$, donde l es la altura del nivel límite; de modo que resulta que

$$\Theta = -\frac{t^2}{2T}(0.995 - \ln 0.005) = 2{,}15\frac{t^2}{T}$$

Apliquemos la fórmula

$$\Theta = 2{,}15\frac{t^2}{T}$$

a los casos que examinamos con anterioridad.

a) $T = 8$min. y $t = 12$ min.:

$$\Theta = 2{,}15\frac{12^2}{8} = 38.7 \text{ min}.$$

El nivel constante se alcanzará en unos 39 min.

b) $T = t = 8$ min.:

$$\Theta = 2{,}15\frac{8^2}{8} = 17.2 \text{ min}.$$

El líquido alcanzará el nivel constante en unos 17 min.

c) $T = 8$ min. y $t = 6$ min.:

$$\Theta = 2{,}15\frac{6^2}{8} = 9.7 \text{ min}.$$

El nivel de líquido será constante dentro de unos 10 min.

d) $T = 30$ min. y $t = 5$ min.:

$$\Theta = 2{,}15\frac{5^2}{30} = 1.8 \text{ min}.$$

De hecho, el líquido alcanzará el nivel límite en menos de dos minutos.

e) Finalmente, la pila con el desagüe abierto se llenará totalmente, lo que ocurre –según determináramos anteriormente– a condición de que $t = 2T$, en un tiempo

$$\Theta = 2{,}15\frac{2t^2}{2t} = 4.3t = 8.6T$$

Con esto damos por terminado el análisis de los problemas de la bañera, que se nos ha hecho tan largo. Es que el asunto es mucho más complicado de lo que se imaginan aquellos autores de libros de problemas de matemáticas que a la ligera incluyen en sus obras "problemas de los depósitos", destinados a los alumnos de la escuela primaria.

74. Vórtices en el agua

Al vaciar la bañera, nos damos cuenta de que junto a su orificio de desagüe se forma un remolino.

¿En qué sentido gira éste, en el de las agujas del reloj o en sentido contrario? ¿Por qué?

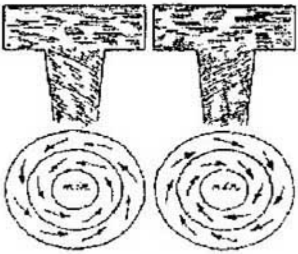
El problema planteado atrajo en su tiempo la atención de D. Grave, famoso matemático ruso, que señaló lo siguiente.

"Si un recipiente se vacía mediante un orificio abierto en su fondo, encima de él se forma un torbellino de líquido que gira, en el hemisferio boreal, en sentido contrario a las agujas del reloj, y en el austral, en sentido inverso. Cada lector puede comprobar la validez de esta observación dejando salir agua de la bañera. Para que la rotación del vórtice sea más evidente, se puede echar al agua trocitos de papel. Esta experiencia evidente comprueba la rotación de la Tierra, aunque se realiza por medios caseros."[10]

A continuación este autor manifiesta lo siguiente: "Lo dicho permite sacar conclusiones muy importantes relativas a las turbinas hidráulicas. Si una turbina hidráulica horizontal gira en sentido antihorario, la rotación del Globo contribuirá a su funcionamiento; y a la inversa: si gira en sentido horario, el giro del Globo frenará la rotación del artefacto." "Por ello –concluye el académico– al fabricar nuevas turbinas hay que inclinar sus paletas de modo que giren en el sentido deseado."

Estos razonamientos aparecen muy verosímiles. Todo el mundo sabe que la rotación de la Tierra condiciona la forma vorticial de los ciclones, un desgaste mayor del carril derecho de las vías férreas, etc. A lo mejor, se podría esperar que la rotación del planeta influiría de alguna manera en los embudos de agua que surgen en los recipientes durante el vaciado, o en las turbinas hidráulicas.

No obstante, no debemos dejarnos cautivar por esta primera impresión. El comportamiento del embudo de agua que se forma encima del orificio de vaciado se comprueba fácilmente y, de hecho, no se ajusta a la descripción que acabamos de citar: en unos casos el remolino se enrosca en sentido antihorario, y en otros, en sentido opuesto. La dirección de giro, lejos de ser constante, no revela ninguna tendencia predominante, máxime si las observaciones se llevan a cabo en diferentes recipientes, y no en uno mismo.



Esquema del movimiento vorticial: arriba, al salir el líquido por el desagüe de la bañera; abajo, del aire en un ciclón.

El cálculo nos proporciona un resultado que concuerda muy bien con las observaciones: la magnitud de la llamada aceleración de Coriolis es muy pequeña y se calcula según la fórmula siguiente:

$$\alpha = 2\omega \times v sen \varphi$$

donde a es la aceleración de Coriolis, v, la velocidad del cuerpo en movimiento, ω, la velocidad angular de rotación de la Tierra y φ, la latitud del lugar. Por ejemplo, en la latitud de San Petersburgo, siendo la velocidad del chorro de agua de 1 m/s se obtienen los datos siguientes: v = 1 m/s, ω = 2/86.400 s; sen φ = sen 60° = 0.87

$$\alpha = \frac{2 \times 2\pi \times 0.87}{86.400} \approx 0.0001 m/s^2$$

Como la aceleración de la gravedad es de 9,8 m/s, la de Coriolis vale una cienmilésima de ésta.

En otras palabras, el esfuerzo que surge es igual a una cienmilésima parte del peso del agua que forma el torbellino. Está claro que cualquier irregularidad en la forma del recipiente, por ejemplo, su asimetría respecto del orificio de vaciado, deberá influir mucho más en el sentido de rotación del chorro de agua que el giro del planeta. El hecho de que al observar el vaciado de un mismo recipiente a veces se suele colegir que el sentido de rotación del vórtice siempre es uno mismo, no comprueba, ni mucho menos, la tan esperada regla de rotación, pues los factores predominantes que intervienen en este caso son la forma del fondo de la pila y sus irregularidades, y no la rotacion de la Tierra.

Por esta razón, a la pregunta planteada hay que responder del modo siguiente: es imposible predecir en qué sentido girará el vórtice de agua junto al orificio situado en el fondo de la pila, ya que éste depende de toda una serie de circunstancias difíciles de considerar. Además, los torbellinos que se crean en el flujo de líquido y que pudieran atribuirse a la rotación del Globo, deben de tener, según comprueba el cálculo, un diámetro mucho mayor que los pequeños remolinos que surgen en torno al orificio de vaciado de un recipiente. Por ejemplo, en la latitud de San Petersburgo, para la velocidad de corriente de 1 m/s, el diámetro de semejante torbellino debería ser de 18 m.; para la velocidad de 0,5 m/s, de 9 m., etc., es decir, variaría en razón directa a la velocidad de corriente.

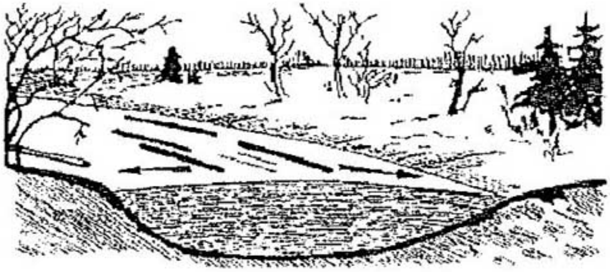
Como colofón vamos a acotar algo más sobre la supuesta influencia de la rotación del planeta en el funcionamiento de las turbinas hidráulicas. Teóricamente, se podría demostrar que toda rueda que gira, es incitada por la rotación de la Tierra a ocupar una posición tal que su eje sea paralelo al del planeta, y que el sentido de giro de ambos cuerpos sea igual. No obstante, el efecto de semejante influencia es ínfimo, al igual que en el caso del embudo de agua formado en el recipiente que se vacía; en otras palabras, la acción del giro de la Tierra constituye menos de una cienmilésima parte de la fuerza de la gravedad. Por consiguiente, toda irregularidad de forma del cuerpo de la turbina que gira, por más insignificante que sea, de por sí muy natural e inevitable, debe influir mucho más y camuflar la influencia que el giro del Globo ejerce sobre dicho artefacto. Por lo tanto, no se han de cifrar muchas esperanzas en que la rotación de la Tierra contribuya ostensiblemente al funcionamiento de los mecanismos.

75. La riada y el estiaje

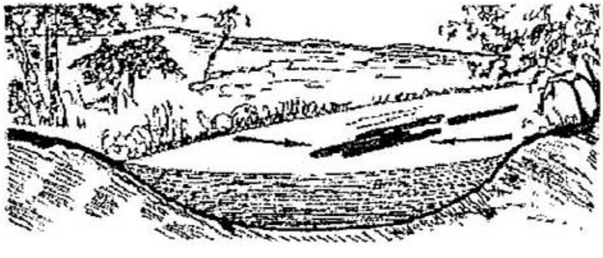
¿Por qué en tiempo de riada la superficie del río es convexa, mientras que durante el estiaje es cóncava?

El hecho de que en épocas de crecida y estiaje la superficie de los ríos no es estrictamente horizontal, se debe a que la parte central, o axial, de la masa de agua corriente tiene velocidad mayor que las partes cercanas a la orilla: la corriente es más rápida en medio del río que junto a las márgenes. Por consiguiente, durante la crecida, cuando desde la parte alta del río viene mucha agua, su grueso fluye a lo largo de la línea central del cauce; a consecuencia de esto el río "se abulta" en su parte media. Al contrario, durante el estiaje, mientras el caudal es pequeño (pues la mayor parte del agua ya está en la cuenca baja) su nivel disminuye más rápido a lo largo de la línea media que junto a las orillas, por lo que la superficie del río se vuelve cóncava.

Este fenómeno es muy notable en los ríos caudalosos y muy anchos. "En el Mississipi –dice el escritor y geógrafo francés J. Reclus en su obra La Terre, description des phénoménes de la vie du globe– la convexidad transversal que se forma durante la crecida es de un metro por término medio...; las maderas que se transportan por flotamiento en esta época "se deslizan" de la parte central prominente del río y quedan en la orilla, mientras que en el estiaje siempre flotan aguas abajo por su parte central y se acumulan en la depresión formada en medio del río."



La superficie del río durante la crecida.



La superficie del río durante el estiaje.

76. El oleaje

¿Por qué se curvan las crestas de las olas que lamen la costa?

Las crestas de las olas que lamen la costa, tienen forma curvada.

El encorvamiento de las crestas de olas que lamen la costa suave se debe a que la velocidad con que viajan por la superficie de aguas someras depende de la profundidad, a saber, está en razón directa con la raíz cuadrada del valor de la profundidad. Cuando las olas se propagan por encima de los bajos de mar, la elevación de sus crestas respecto al fondo es mayor que la de los valles de onda; por consiguiente, las crestas avanzan más veloces que los valles que les preceden y, adelantándose a ellos, se curvan hacia adelante.

Este mismo hecho explica la causa de otro fenómeno que se observa en el mar agitado: las olas que baten la costa siempre son paralelas a ésta. La causa radica en que cuando se acercan hacia la orilla bajo un ángulo formando barreras paralelas, las que pasan por encima del bajío cercano a la orilla antes que las otras, aminoran su paso. Es fácil ver que a consecuencia de este fenómeno la línea de olas debe cambiar la dirección de su movimiento hasta que sea paralela a la costa.

77. El problema de Colladon

El célebre físico Jean-Daniel Colladon planteó a los estudiantes de la Academia de Ingeniería de París el problema siguiente:

"Un barco se desplazó por el Ródano aguas arriba elevándose a 170 m. (desde Marsella hasta Lyon). Para calcular el trabajo realizado durante el viaje, ¿habrá que tener en cuenta también el producto del peso del barco por la altura de 170 m., además de la resistencia de la corriente?"

La superficie del río se asemeja a un plano inclinado, por eso se podría suponer que al navegar aguas arriba el barco debe realizar la misma cantidad de trabajo que un cuerpo deslizando hacia arriba por un plano inclinado. Pero no debemos olvidar que el empuje del agua equilibra el peso del barco que navega. Para elevarlo a un nivel más alto no se necesita realizar ningún trabajo y no vale la pena tomar en consideración a este último.

Lo notable es que entre los estudiantes de la academia que tuvieron que resolver este problema, uno solo dio la respuesta correcta; posteriormente aquel estudiante se hizo un ingeniero de ferrocarriles muy famoso en Francia.

Capítulo Tercero

GASES

78. El tercer componente del aire
79. El gas más pesado
80. ¿Resistimos un peso de 20t?
81. La fuerza del aliento
82. La presión de los gases de la pólvora
83. Unidad de medida de la presión atmosférica
84. El agua contenida en un vaso puesto boca abajo
85. El huracán y el vapor
86. La fuerza de tiro de una chimenea
87. ¿Dónde hay más oxígeno?
88. Las burbujas
89. Las nubes
90. La bala y el balón
91. ¿Por qué es posible pesar un gas?
92. El ejemplo de los elefantes
93. La presión creada en la barquilla del globo estratostático
94. La cuerda de la válvula
95. Un barómetro suspendido de una balanza
96. El sifón en el aire
97. El sifón en el vacío
98. El sifón para los gases
99. Elevación del agua mediante una bomba
100. La salida del gas
101. Un proyecto de motor que no consume energía
102. Sofocar incendios con agua hirviendo
103. Gas contenido en un recipiente
104. Una burbuja en el fondo de un océano
105. La rueda de Segner en el vacío

106. El peso del aire seco y húmedo
107. El vacío máximo
108. ¿Qué es lo que se entiende por vacío?
109. ¿Por qué existe la atmósfera?
110. Un gas que no llena todo el recipiente

78. El tercer componente del aire

Indique el tercer componente constante del aire atmosférico, según el porcentaje.

Muchos lectores continúan considerando "por inercia" que el tercer componente constante del aire es el bióxido carbónico que, cuantitativamente, ocupa el tercer lugar después del nitrógeno y el oxígeno. No obstante, hace mucho tiempo que se ha descubierto otro componente del aire, cuyo contenido es 30 veces mayor que el del bióxido carbónico. Éste es el argón, uno de los llamados gases nobles. Su contenido en el aire es del 1% (más exactamente, del 0,94 %), mientras que el del bióxido carbónico es del 0,03 %.

79. El gas más pesado

Entre los elementos gaseosos, ¿cuál es el más pesado?

Sería erróneo creer que el elemento gaseoso más pesado es el cloro cuyo peso es 2,5 veces mayor que el del aire. Existen otros mucho más pesados. Si hacemos caso omiso del radón, o la emanación del radio, muy efímero, que pesa ocho veces más que el aire, tendremos que colocar en el primer lugar el gas xenón que es 4,5 veces más pesado que el aire. El aire atmosférico contiene una cantidad ínfima de xenón, a saber, cada 150 m. de aire contienen 1 cm. de este elemento.

Si hubiera que indicar un compuesto gaseoso en vez de un elemento gaseoso, entre los gases más pesados tendríamos que citar el tetracloruro de silicio ($SiCl_4$) que pesa 5,5 veces más que el aire, y el carbonilo de níquel cuyo peso supera seis veces el del aire.

Los vapores de diversos gases suelen pesar más que el aire: los de bromo pesan 5,5 veces más que este último; los de mercurio, 7 veces más. (Por supuesto, el lector recuerda el rasgo más importante que sirve para distinguir entre vapor y gas: este último tiene una temperatura superior a la crítica, mientras que el primero la tiene menor que la crítica.)

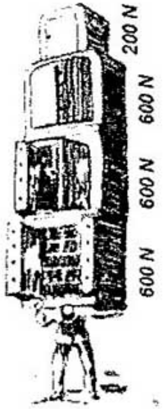
80. ¿Resistimos un peso de 20 t.?

Consta que la superficie del cuerpo humano mide 2 m.: ¿podemos considerar que el peso total que la atmósfera ejerce sobre el hombre es de 20 t. (200.000 N)?

Carece de todo sentido la afirmación tradicional de que el cuerpo humano soporta una fuerza de 200 kN por parte de la atmósfera. Vamos a ver, de dónde aparecen los 200 kN.

Se suele hacer el cálculo de la manera siguiente: cada centímetro cuadrado de la superficie del cuerpo está expuesto a la presión de 10 N; toda la superficie del cuerpo humano mide 20.000 cm., "por consiguiente, la fuerza total vale 200.000 N = 200 kN".

En este caso se prescinde del hecho de que las fuerzas aplicadas a diferentes puntos del cuerpo tienen sentidos diferentes; sería ilógico sumar las fuerzas "aritméticas" dirigidas bajo cierto ángulo unas respecto a otras. Por supuesto, es posible sumarlas, pero siempre ateniéndose a la regla de adición vectorial y obteniendo un dato muy distinto del anunciado al plantear el problema. Se obtendría una resultante equivalente al peso del aire comprendido en el volumen del cuerpo. Si quisiéramos determinar la magnitud de la presión ejercida sobre la superficie del cuerpo humano en vez de la referida resultante, sólo podríamos afirmar que éste está expuesto a una presión de 10 N/cm. Hasta aquí lo que se podría decir acerca de la presión ejercida sobre nuestro cuerpo por la atmósfera terrestre.



"Resistimos un peso de 20.000 kg. ejercida por la columna de aire de 300 km. de altura. No la sentimos porque no solo nos oprime por arriba, sino que también nos presiona desde abajo e incluso desde dentro, equilibrándose de esa manera".
Esta figura y el pie de ella fueron tomados de un libro de divulgación científica.

Resistimos fácilmente esta presión porque la equilibra una presión equivalente dirigida desde dentro del cuerpo; su valor absoluto no es muy elevado, de 0,1 N/mm. Esta magnitud relativamente pequeña de la presión explica el hecho de por qué las paredes de las células de los tejidos del organismo no se destruyen por la presión bilateral.

Obtendríamos valores impresionantes de la presión formulando esta pregunta de un modo distinto, por ejemplo:

1) ¿Con qué fuerza la atmósfera terrestre oprime la parte superior de nuestro cuerpo contra la inferior?
2) ¿Con qué fuerza la atmósfera aprieta la parte izquierda y la derecha de nuestro cuerpo entre sí?

Para responder a la primera pregunta habría que calcular la fuerza de presión correspondiente al área de la sección transversal de nuestro cuerpo, o a la de su proyección horizontal (de unos 1000 cm.); se obtendría una fuerza de 10 kN. En el segundo caso tendríamos que determinar la presión ejercida sobre la proyección vertical del cuerpo (de cerca de 5000 cm.); el resultado sería 5 kN.

Mas, estos datos espectaculares nos dicen lo mismo que sabíamos al empezar el cálculo, es decir, que a cada centímetro cuadrado de nuestro cuerpo corresponde una fuerza de 10 N. Éstas no son sino dos formas de expresar una misma idea.

81. La fuerza del aliento

¿Cuál es la fuerza del aliento de la persona? ¿Es menor o mayor que 1 atmósfera la presión del aire despedido con violencia por la boca?

El aire que expiramos tranquilamente tiene un exceso de presión de cerca de 0,001 at. con respecto al ambiente.

Al despedirlo con fuerza, lo comprimimos mucho más, elevando el exceso de presión hasta 0,1 at. respecto al ambiente. Esta magnitud corresponde a 76 mm. de mercurio. Dicha fuerza se manifiesta evidentemente cuando una persona sopla aire en un extremo del tubo de manómetro de mercurio abierto, elevando el nivel de líquido en la otra rama: hay que hacer un esfuerzo considerable con los músculos pectorales para que la diferencia de niveles sea de 7 u 8 cm. (Los sopladores de vidrio experimentados son capaces de elevar el mercurio hasta 30 cm. o más.)

82. La presión de los gases de la pólvora

¿Qué presión tienen los gases de la pólvora que despiden el proyectil por la boca del cañón?

En las piezas de artillería modernas, los gases de la pólvora expulsan los proyectiles creando una presión de hasta 4000 at., lo cual corresponde a la presión de una columna de agua de 40 km.

83. Unidad de medida de la presión atmosférica

¿Qué unidades sirven para medir la presión del aire?

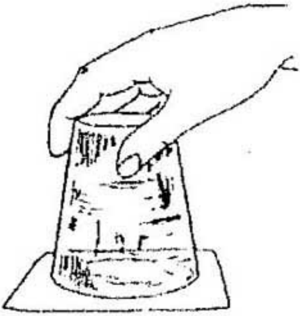
Hoy en día se dan por anticuadas las unidades de medida de la presión atmosférica en milímetros de mercurio o en kg/cm. En la meteorología se suele emplear otra unidad, fuera del sistema de unidades, denominada "milibar".

El milibar, según indica su nombre (mili), es una milésima del bar. El bar es la unidad de la presión atmosférica equivalente a cien mil pascales. En el Sistema Internacional de unidades (SI), que se utiliza fundamentalmente hoy en día, por unidad de presión está adoptado el pascales (Pa), equivalente a la presión creada por una fuerza de 1 N distribuida uniformemente por una superficie de 1 m. normal a ella. Para traducir el pascal a otras unidades se emplean las relaciones siguientes:

1 mmHg = 133 Pa; 1 Kponds/cm = 1 at = 9,81 ≈ 10 Pa; 1 bar = 10 Pa

84. El agua contenida en un vaso boca abajo

Es harto conocido el experimento con una hoja de papel que no se separa de los bordes de un vaso con agua puesto boca abajo. Su descripción aparece en muchos libros de texto escolares y de divulgación científica. Por lo general, este fenómeno se explica de la siguiente manera: la hoja de papel experimenta una presión de una atmósfera por abajo, en tanto que desde arriba sólo la empuja el agua cuya fuerza es mucho menor (tantas veces menor como la columna de agua de 10 m. de altura, correspondiente a la presión atmosférica, es mayor que el vaso); el exceso de presión aprieta el papel a los bordes del recipiente.



¿Por qué la hoja de papel no se desprende del vaso?

Si esta explicación es correcta, la hoja de papel estará apretada a los bordes de la vasija con una fuerza de casi una atmósfera (0,99 at.). El diámetro de la boca del vaso es de 7 cm., por consiguiente, la hoja de papel estará sujeta a una fuerza de casi. No obstante, consta que para desprender la hoja de papel en este caso no se necesita tanta fuerza, sino que basta aplicar un esfuerzo insignificante. Una lámina metálica o de vidrio, que pese unas decenas de gramos, también aplicada a la boca de un vaso invertido, se desprende bajo la acción de la fuerza de la gravedad. Es evidente que esta explicación corriente del experimento no sirve.

¿Cómo explicaría usted este fenómeno?

Sería erróneo creer que el vaso sólo contiene agua y no contiene aire, pues la hoja de papel está muy pegada al líquido. Por supuesto, en este recipiente hay aire. Si entre dos superficies planas que están en contacto, no hubiera una capa de aire, sería imposible levantar ningún objeto colocado sobre la mesa, apoyado sobre ella con su base plana: habría que vencer la presión atmosférica. Al cubrir la superficie de agua con una hoja de papel, siempre dejamos una delgada capa de aire entre ellas.

Vamos a examinar lo que ocurre en el vaso al invertirlo. La hoja de papel se comba un poco bajo el peso del líquido, y si en vez de papel se utiliza una lámina, ésta se apartará un poco de los bordes de la pieza. Sea lo que fuere, debajo del fondo del recipiente se desocupa un espacio para el aire que había entre el agua y el papel (o la lámina); este espacio es mayor que el inicial, por lo cual el aire se rarifica y su presión disminuye.

Ahora la hoja de papel sufre la acción de toda la presión atmosférica (desde afuera) y parte de la presión atmosférica más el peso del agua (desde dentro). Ambas magnitudes, la interna y la externa, están equilibradas. Por tanto, basta aplicar un esfuerzo muy pequeño, superior a la fuerza de adhesión (o sea, a la tensión superficial de la película de líquido) para desprender el papel de los bordes del vaso.

La deformación de la hoja de papel bajo el peso del agua debe ser insignificante. Cuando el espacio de aire aumenta en 0,01 parte de su volumen, en la misma magnitud disminuirá la presión del gas dentro del vaso. La centésima parte de la presión atmosférica que falta, se compensa con el peso de los 10 cm. de la columna de agua. Si inicialmente el espacio de aire entre el agua y la hoja de papel era de 0,1 mm., basta que su espesor aumente en $0{,}01 \times 0{,}1$, es decir, en 0,001 mm. (en 1 micra) para explicar por qué la hoja de papel queda adherida a la boca del vaso invertido. Por eso no vale la pena tratar de advertir a simple vista el pandeo de la hoja.

En los libros, donde se describe este experimento, se exige a veces que el vaso esté lleno hasta los bordes, pues de otra manera será imposible obtener el efecto deseado, ya que habrá aire a ambos lados de la hoja, por lo cual la presión interna y externa del aire se equilibrará y la hoja se desprenderá bajo la acción del peso del agua. Después de realizar este experimento nos damos cuenta de que ésta es una advertencia gratuita: la hoja sigue adherida como si el vaso estuviera completamente lleno. Al apartarla un poco veremos burbujas que entran por la abertura. Este hecho comprueba que el aire contenido en el recipiente está enrarecido (en otro caso el aire ambiente no penetraría a través del agua).

Evidentemente, cuando el vaso se invierte, la capa de agua que se desplaza hacia abajo, desaloja parte del aire, en tanto que el gas que se queda, se rarifica ocupando un volumen mayor. El enrarecimiento del aire es más notable que en el caso del vaso completamente lleno: lo comprueban fehacientemente las burbujas de aire que se cuelan en el vaso si la hoja se aparta un poco. Cuanto mayor es el enrarecimiento, tanto más estará adherida la hoja al cristal. Para terminar de describir este experimento, que no es tan sencillo como parecía a primera vista, advirtamos que la hoja de papel podrá seguir pegada al vaso a pesar de que encima de ella no haya líquido: para ello hace falta que el cristal esté mojado y la hoja no pese demasiado. En semejante caso seguirá adherida debido a la fuerza de tensión superficial de la fina película de agua. Si la circunferencia del borde del vaso mide 25 cm. de longitud, la película de agua tendrá una fuerza de tensión superficial (el coeficiente de tensión superficial del agua es de 74 · 10 N/cm) igual a

$$75 \times 10^{-5} \times 25 \times 2 = 3750 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{N}.$$

Esta fuerza puede sostener un peso de unos 4 g. Por consiguiente, si la masa de la hoja de papel no supera los 4 g., ésta seguirá adherida a los bordes mojados del vaso.

85. El huracán y el vapor

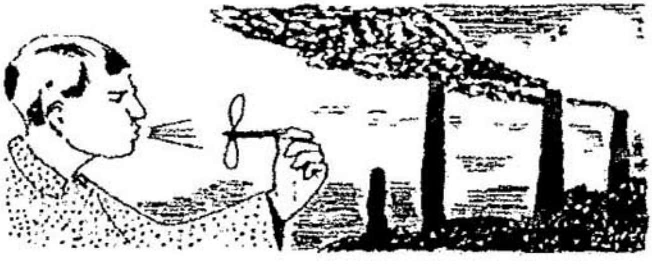
Compare la presión de un huracán y la presión de trabajo que se genera en el cilindro de una máquina de vapor. ¿Cuántas veces, aproximadamente, la primera supera la segunda?

El huracán más devastador que desprende de la tierra robles seculares y destruye muros de fábrica, ejerce una presión mucho menor que la generada dentro del cilindro de una máquina de vapor. Su presión es de unos 3000 N/m., lo cual constituye cerca de 0,03 de la presión atmosférica normal. Este dato es muy modesto: la presión del vapor en el cilindro de la máquina asciende a decenas de atmósferas aun cuando no sea una máquina con presión de trabajo muy alta. Por consiguiente, podemos afirmar que el huracán más fuerte tiene una presión cientos de veces menor que el vapor que realiza trabajo en el cilindro de una máquina de vapor.

86. La fuerza de tiro de una chimenea

Compare el empuje del aire que una persona despide con fuerza por la boca y la intensidad de tiro de una chimenea de 40 m. de alto. Si expresamos estas dos magnitudes en milímetros de mercurio, ¿cuál será la razón?

Al contemplar la chimenea de una fábrica, surge la idea de que su fuerza de tiro es enorme. Pero en realidad la fuerza de tiro de semejantes obras es muy pequeña: cuando una persona despide aire por la boca, la presión es mucho más alta.



Es muy fácil cerciorarse de esto haciendo un cálculo sencillo. La fuerza de tiro equivale a la diferencia del peso de dos columnas de aire, del exterior y del interior contenido en la chimenea (siendo iguales sus alturas y áreas de las bases). El aire interior se calienta hasta una temperatura no mayor de 300° C, por lo cual se puede considerar que en este caso su peso se reduce aproximadamente a la mitad; luego el peso de un metro cúbico de aire interior será dos veces menor que el del mismo volumen de aire exterior. Como la chimenea mide 40 m. de altura, la diferencia de peso de las dos columnas de aire, caliente y frío, equivale al peso de una columna de aire exterior de 20 m. de altura. Consta que el aire atmosférico es 10.000 veces más ligero que el mercurio, por ello, la columna de aire de 20 m. de altura pesará lo mismo que una de mercurio de

$$20.000 : 10.000 = 2 \text{ mm.}$$

Así pues, acabamos de determinar que la fuerza de tiro de la chimenea sólo es de 2 mm. de mercurio. La fuerza que empuja el aire por tal conducto es inferior a 30 N/cm. El exceso de presión que una persona crea al despedir violentamente aire por la boca, equivale a unos 70 mm. de mercurio. o sea, es 35 veces mayor que dicha fuerza. Al soplar el aire, le imprimimos una velocidad mayor que la del movimiento de gases por la chimenea más alta.

Estos resultados algo inesperados pueden dar lugar a dudas. ¿Cómo es posible que una fuerza insignificante pueda provocar una afluencia tan enérgica de aire al hogar? Pero no olvidemos que en este caso la fuerza, no muy elevada, pone en movimiento una masa bastante pequeña (un litro de aire caliente que fluye por el conducto tiene una masa de 0,65 g.); por ello, la aceleración es considerable.

Por otro lado, se podría hacer la siguiente pregunta: ¿por qué hace falta levantar obras tan altas, como la chimenea de una fábrica, para crear un tiro de 2 mm. de mercurio? ya que un ventilador ordinario crea un tiro mucho más eficiente. Este razonamiento viene muy al caso. Pero si no hubiera chimeneas tan altas, ¿adónde irían los gases de combustión, tan perjudiciales para la persona, los animales y las plantas? Éstos deben ser disipados en la atmósfera, lo más alto que se pueda.

87. ¿Dónde hay más oxigeno?

¿Qué aire contiene más oxigeno, el que respiramos nosotros o el que respiran los peces?

El aire respirable contiene el 21 % de oxígeno. Se sabe que en un litro de agua se disuelve dos veces más oxígeno que nitrógeno. A esto se debe el elevado contenido de oxígeno –el 34 %– en el aire disuelto en el agua. (A su vez, el aire atmosférico contiene el 0,04 % de bióxido carbónico, mientras que el agua, el 2 %).

88. Las burbujas

En un vaso lleno de agua de grifo, que se encuentra en un ambiente cálido, aparecen burbujas. Trate de explicar este fenómeno.

Las burbujas que se forman en el agua fría al empezar a calentarla, son de aire: de esa manera se desprende parte del aire disuelto en ella. A diferencia de la solubilidad de los sólidos, la de los gases disminuye al elevar su temperatura. Por ello, durante el calentamiento el agua ya no puede contener disuelta la misma cantidad de aire que antes, y el exceso de gas se desprende en forma de burbujas.

He aquí algunos datos numéricos. Un litro de agua contiene 19 cm. de aire a 10° C (agua del grifo) y 17 cm. de aire a 20° C (temperatura ambiente).

De cada litro de líquido se desprenden 2 cm. de aire. Como un vaso contiene un cuarto de litro de agua, en las condiciones indicadas del vaso lleno hasta los bordes se desprenden 500 mm. de aire. Dado que el diámetro medio de una burbuja es de 1 mm., de esta cantidad de gas se formarán mil burbujas.

89. Las nubes

¿Por qué las nubes no se precipitan hacia la tierra?

A esta pregunta se suele responder frecuentemente de la siguiente manera: "Porque el vapor de agua es más ligero que el aire". Por cierto, no hay quien dude de este hecho; sin embargo, las nubes no constan únicamente de vapor de agua. Éste es invisible; si las nubes sólo consistieran en él, serían perfectamente transparentes. Las nubes y la niebla (son lo mismo) constan de agua en estado líquido y no gaseoso. En este caso el asunto queda mucho más embrollado: ¿por qué, pues, las nubes flotan en el aire en vez de precipitarse a la tierra?

En cierta época predominó el criterio de que las nubes se componen de diminutas ampollas de película de agua llenas de vapor de agua. Hoy en día todo el mundo sabe que tanto las nubes como la niebla no son ampollas de agua, sino gotitas de agua de 0,01 a 0,02 mm. de diámetro, e incluso de 0,001 mm. Desde luego, tales corpúsculos pesan 800 veces más que el aire seco. No obstante, a pesar de que tienen una superficie considerable en comparación con su masa, descienden con gran lentitud, puesto que el aire les opone una resistencia considerable durante la caída. Por ejemplo, las gotitas de líquido de 0,01 mm. de radio caen uniformemente con una velocidad de 1 cm/s. Quiere decir que las nubes no flotan en el aire, sino que están cayendo muy lentamente; basta un flujo de aire ascendente para que una nube deje de caer y ascienda.

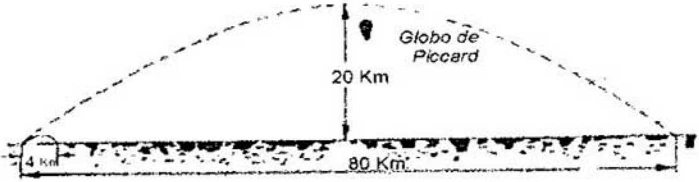
Conque, de hecho las nubes tienden a descender, pero su descenso es tan lento que no se advierte a simple vista o bien es contrarrestado por flujos de aire ascendentes.

Por esta misma razón están flotando en el aire las partículas de polvo, aunque la masa de muchas de ellas (por ejemplo, de las de diversos metales) supera miles de veces la del aire.

90. La bala y el balón

¿A qué objeto el aire opone mayor resistencia, a una bala o a un balón?

Sería ingenuo creer que un medio tan poco consistente como el aire no oponga resistencia más o menos notable a una bala disparada. Al contrario, precisamente la gran velocidad de movimiento de ese proyectil condiciona una considerable resistencia por parte del aire. Se sabe que una escopeta tiene un alcance de 4 km. ¿Cuál sería éste si el aire no opusiera resistencia a la bala?



Como resultado de la resistencia del aire el alcance de la bala es de 4 km. en vez de 80 km.

Pues, ¡sería 20 veces más largo! Este hecho parece increíble; para cerciorarnos de ello, hagamos el cálculo siguiente.

La bala sale por la boca del cañón de la escopeta con una velocidad de unos 900 m/s. Según la mecánica, en el vacío un proyectil tiene la velocidad máxima si se arroja con un ángulo de 45° respecto al horizonte; en este caso el alcance se determina haciendo uso de la fórmula siguiente:

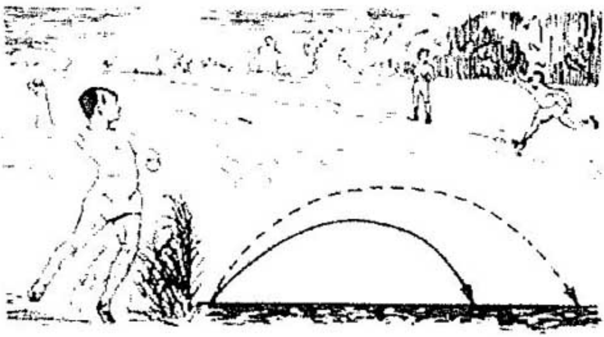
$$L = \frac{v^2}{g}$$

donde v es la velocidad inicial y g, la aceleración de la fuerza de la gravedad. En el caso que estamos analizando, $v = 900$ m/s y $g \sim 10$ m/s. Al sustituir v y g en la fórmula por sus valores correspondientes obtenemos el dato siguiente:

$$L = 900^2 / 10 = 81.000 \text{ m.} = 81 \text{ km.}$$

Esta influencia tan notable del aire en el movimiento de la bala se debe a que la magnitud de la resistencia del medio crece en razón directamente proporcional a la velocidad elevada a la segunda (y algo más que a la segunda) potencia, y no a la primera potencia. Por esta razón, el aire opone una resistencia tan insignificante a una pelota arrojada con una velocidad de sólo 20 m/s, que prácticamente podemos despreciarla, aplicando al movimiento de este proyectil las fórmulas de mecánica sin restricción alguna. Una pelota lanzada en el vacío bajo un ángulo de 45° al horizonte y con una velocidad inicial de 20 m/s tendría un alcance de 40 m. ($20^2 : 10$); en condiciones reales su alcance es casi el mismo.

Los profesores de mecánica harían muy bien si en sus ejercicios de cálculo analizaran el movimiento de una pelota en vez del desplazamiento de balas y obuses: los resultados estarían más de acuerdo con la realidad que aquellos números fantásticos que se obtienen cuando se menosprecia la resistencia que el aire ofrece a estos últimos.



Debido a la resistencia del aire la pelota sigue una curva balística señalada con línea continua en vez de describir la parábola representada por la línea de trazos.

91. ¿Por qué es posible pesar un gas?

La física afirma que las moléculas de los gases están en constante movimiento. ¿De qué manera las moléculas que se mueven a gran velocidad en el vacío ejercen presión sobre el fondo del recipiente?

¿Por qué solemos considerar que el peso de un gas equivale a la suma de los pesos de las moléculas que lo componen?

Los libros de texto y los cursos de física no prestan atención a este problema tan sencillo que puede surgir en la mente de cualquier alumno y puede dejarlo perplejo. No obstante, este problema es muy fácil de resolver.

Independientemente de la dirección que sigue una molécula –hacia abajo, hacia arriba, hacia un lado o bajo un ángulo–, su movimiento "térmico" se suma a la caída a plomo provocada por la fuerza de la gravedad. Sólo estas componentes estrictamente verticales influyen en el peso de un gas; las demás velocidades puramente "térmicas" condicionan una presión igual de las moléculas de gas sobre las paredes del recipiente y no les comunican movimiento progresivo. Como dichas velocidades en modo alguno influyen en el peso del gas, para resolver este problema, con toda razón podemos abstraernos de ellas y darlas por inexistentes.

¿Qué fenómenos y magnitudes tendremos que analizar? Tendremos una lluvia de moléculas que caen a plomo rebotando del fondo e intercambiando sus velocidades durante las colisiones[11]. El intercambio de velocidades equivale al hecho de que una molécula atraviese a otra al chocar con ella. Por ello, podemos considerar que todas las moléculas alcanzan el fondo del recipiente sin encontrar resistencia alguna. Este cuadro simplificado facilita mucho el análisis.

Así pues, observemos cómo se comporta una molécula. Al chocar contra el fondo, rebota con la misma velocidad y asciende a la altura desde la cual había caído. Desde esta misma altura la molécula cae por segunda vez, por tercera, etc. Si el tiempo de caída es t, durante un segundo la molécula chocará con el fondo

$$n = \frac{1}{2t} \text{ veces}$$

($2t$ porque entre dos choques seguidos la molécula debe recorrer un trecho dos veces, una vez hacia abajo y otra hacia arriba, invirtiendo el mismo tiempo en ambos casos). El valor de t se determina utilizando la fórmula siguiente:

$$h = \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \qquad n = \frac{1}{2t} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{g}{2h}}$$

donde h es la altura de caída. La velocidad que la molécula tiene al chocar con el fondo, es igual a

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

El impulso p de cada choque equivale a la diferencia de cantidades de movimiento antes y después del choque:

$$p = m \times v - m \times (-v) = 2 \times m \times v$$

mientras que el impulso total P de los n choques vale

$$P = np = 2mvn = 2m \times \frac{1}{2}\sqrt{\frac{g}{2h}} \times \sqrt{2gh} = mg$$

Así pues, cada segundo una molécula comunica al fondo un impulso igual a mg, además,

$$P = F \times t_0 = F \times 1 = F$$

Por consiguiente, $F = mg$, o sea, la fuerza de choque es igual al peso de la molécula. Queda claro que si la fuerza de choque de una molécula es igual a su peso, y todas las moléculas contenidas en el recipiente alcanzan el fondo, este último recibirá un impulso equivalente al peso total de las moléculas de gas.

Recordemos que hemos sustituido el recipiente con moléculas en movimiento caótico por otro, en el cual las moléculas siguen la línea de plomada. Como dichos recipientes son iguales en lo que se refiere al peso de las moléculas, la conclusión sacada para uno de ellos también será válida para el otro.

Tal vez, el lector desee saber, de qué modo las moléculas transfieren su peso al fondo del recipiente. Las que siguen la línea de plomada, le comunican su fuerza de choque directamente o mediante otras moléculas chocando e intercambiando velocidades con ellas (recordemos que sólo se trata de la transferencia de la componente generada por la fuerza de la gravedad). Las moléculas que chocan oblicuamente con las paredes laterales rebotando hacia abajo, transmiten su fuerza de choque a través de ellas. A su vez, las que dan con la tapa o con las paredes laterales bajo un ángulo rebotando hacia arriba, le comunican un impulso menor, puesto que su velocidad disminuye a consecuencia de la acción de la fuerza de la gravedad; además, la atenuación del golpe dado hacia arriba aumenta el impulso que las moléculas comunican al fondo. Nos queda examinar el caso de las moléculas que chocan con las paredes del recipiente bajo ángulo recto. Una molécula sujeta a la fuerza de la gravedad choca a escuadra con la pared del recipiente, mientras que si no lo estuviera, lo haría rebotando hacia arriba disminuyendo de esa manera la presión sobre el plato de la balanza que sostiene el recipiente. La gravedad anula esta disminución de presión, es decir, aumenta el peso del recipiente.

Hemos planteado el problema de la transmisión del peso refiriéndonos a los gases. Mas, de hecho, también podríamos examinar el caso de los líquidos y los sólidos, puesto que todos los cuerpos constan de moléculas que se mueven caóticamente (menos los cristales que se componen de átomos) sin asociarse unas con otras. Según vemos, en principio, las condiciones son las mismas que en el caso de los gases. Las moléculas que componen diversos cuerpos, siempre transmiten su peso al soporte mediante numerosos golpes aislados; al cambiar el estado del cuerpo, sólo se modifica el mecanismo de transmisión.

92. El ejemplo de los elefantes

Los elefantes pueden permanecer bajo agua respirando mediante la trompa asomada a la superficie. Cuando las personas trataban de seguir este ejemplo valiéndose de un tubo, padecían de hemorragia por la boca, la nariz y los oídos; semejante práctica causaba graves enfermedades y aun la muerte de los buzos. ¿Por qué?

La causa de las alteraciones que se observan cuando una persona permanece bajo agua respirando mediante un tubo, reside en la diferencia de presión fuera y dentro del cuerpo humano.

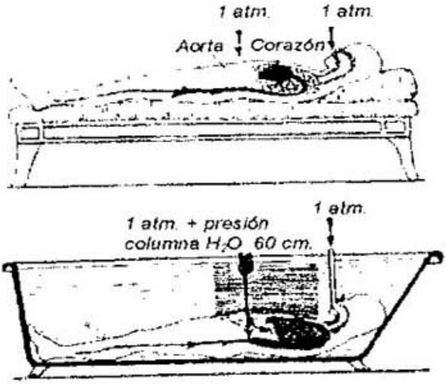
Desde dentro del tórax, por parte de los pulmones, el aire "normal" presiona con la fuerza de 1 at., mientras que la presión ejercida desde afuera es de 1 at. + la columna de agua de altura equivalente a la profundidad de inmersión.

Si se sumerge a una profundidad de 50 cm., el tórax sufre una presión excesiva desde afuera, equivalente a 50 cm. de agua, o a 50 ponds/cm (5 kponds/dm). Esta circunstancia no puede menos que dificultar notablemente la respiración: se tiene que respirar soportando un peso de 15 a 20 kg. aplicado al pecho. Sin embargo, el problema no sólo consiste en esto;

además se altera gravemente la circulación sanguínea. La sangre se desplaza de aquellas partes del cuerpo donde la presión es más alta (las piernas y el abdomen) a las zonas de presión menor, o sea, al tórax y a la cabeza. Como los vasos de estas zonas están repletos de sangre, se dificulta la circulación de la sangre procedente del corazón y la aorta, por lo cual estos últimos se dilatan desmedidamente, a consecuencia de lo cual la persona puede morir o enfermar gravemente.

¿Por qué el hombre no puede seguir el ejemplo del elefante?

El médico austriaco R. Stiegler comprobó este efecto en una serie de experimentos y los describió en uno de sus libros. Los realizó consigo mismo, sumergiéndose enteramente en el agua y respirando mediante un tubo. R. Stiegler se dio cuenta de que cuando su pecho se encontraba a la profundidad de un metro, era imposible respirar. Sumergido a la profundidad de 60 cm., podía permanecer bajo agua durante 3,75 min., a la profundidad de 90 cm., 1 min., y a la de 1,5 m., no más de 6 s. Pero cuando se arriesgó a zambullirse a 2 m., al cabo de unos segundos su corazón se dilató tanto que el experimentador tuvo que guardar cama durante tres meses para normalizar su circulación sanguínea.



El efecto que la presión atmosférica produce en el organismo humano rodeado de aire (arriba) y sumergido en agua (abajo).
La figura explica por qué el hombre es incapaz de respirar bajo agua como el elefante de la figura anterior.

Posiblemente, el lector pregunte, ¿por qué nos zambullimos a gran profundidad y permanecemos allí durante cierto tiempo sin que nos pase algo grave? Es que durante la zambullida las condiciones son muy distintas. Antes de lanzarse al agua, la persona llena de aire el pulmón; a medida que se sumerge en el agua, este aire se comprime cada vez más por la presión del líquido, ejerciendo en cada instante una presión equivalente a la de este último. Por eso, el corazón no se rellena de sangre. En la misma situación se encuentra el buzo que lleva puesta una escafandra (la presión del aire suministrado al casco es igual a la del agua), así como los operarios que se sumergen en cajones neumáticos.

Nos queda por contestar la pregunta siguiente: ¿por qué el elefante no muere cuando se sumerge en el agua asomando su trompa a la superficie? No muere porque es elefante: si nuestro organismo fuera tan resistente como el de este animal, y tuviéramos músculos tan fuertes, también podríamos sumergirnos a gran profundidad sin consecuencia alguna.

93. La presión creada en la barquilla del globo estratosférico

El Prof. Piccard realizaba sus ascensiones a la estratosfera en una cápsula esférica de aluminio de 2,1 m. de diámetro y de 3,5 mm. de grosor de las paredes. En el interior de esta cápsula absolutamente hermética se mantenía la presión atmosférica normal, mientras que a la altura a que ascendía el globo la presión exterior era de 0,1 at. aproximadamente.

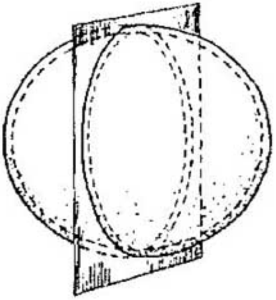
Cada centímetro cuadrado de superficie de aquella cabina esférica experimentaba un exceso de presión de 0,9 kg. (9 N/cm) desde dentro de ésta. Es fácil calcular que sus hemisferios sufrían la acción de una fuerza de 35 t. (350.000 N) que tendía a separarlos. ¿Por qué, pues, la cabina resistió aquella presión tan fuerte y no se destruyó?

Calculemos el esfuerzo de desgarre que corresponde a cada centímetro cuadrado de la sección de la envoltura. La fuerza que tiende a desgarrar la cápsula en dos hemisferios es igual a

$$0.9 \times 10^5 \times \frac{\pi}{4} \times 2 \times 1^2 = 350.000N$$

(no hay que partir de la superficie del hemisferio, sino de su proyección sobre el plano, es decir, del área del círculo máximo).

El profesor Piccard y su compañero de viaje, junto a la cápsula de aluminio.



Sección de la cápsula esférica de Piccard según el círculo máximo.

Dicha fuerza está aplicada al área acotada por la línea de empalme de los dos hemisferios. La pared de la cápsula esférica mide 3,5 mm. = 0,35 cm. de espesor, por lo cual la referida área es de unos

$$\pi \times 210 \times 0.35 = 230\ cm^2$$

A cada centímetro cuadrado le corresponde una presión de

$$350.000 : 230 = 1500\ N/cm^2$$

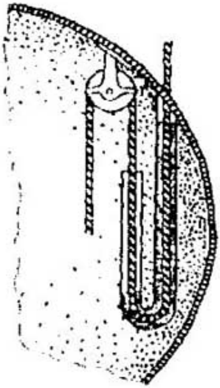
El aluminio se destruye bajo la carga de 10.000 N/cm² si es fundido, y de 25.000 N/cm² si es laminado. De modo que queda claro que el margen de seguridad del artefacto superaba de ocho a veinte veces la mencionada carga límite.

94. La cuerda de la válvula

Un extremo de la cuerda que permitía manipular la válvula del globo de Piccard debía entrar en la barquilla. ¿Cómo había que asegurar el orificio por el que entraba la cuerda para que el aire no saliera de la cabina al medio ambiente enrarecido?

Para introducir una cuerda que permitiera manejar la válvula desde la barquilla hermética del globo estratostático, el Prof. Piccard inventó un dispositivo muy sencillo que posteriormente fue utilizado en semejantes globos construidos en Rusia. En el interior de la barquilla colocó un tubo de sifón cuya rama larga se comunicaba con el espacio exterior. El tubo contenía mercurio.

La presión interna de la cápsula no debía superar la externa más que en 1 at., por lo cual el nivel de mercurio de la rama larga del tubo no superaba el de la parte corta más que en 76 cm. Por el interior del tubo pasaba la cuerda de la válvula, cuyo desplazamiento no alteraba la diferencia de niveles de líquido. Se podía tirar de la cuerda sin temer que escapase aire de la barquilla, puesto que el mercurio cerraba el conducto por el cual se desplazaba la cuerda.

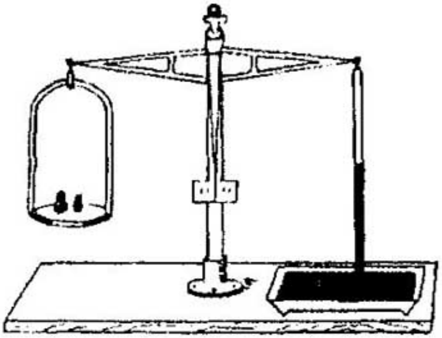


La solución de Piccard al problema de la cuerda para manejar la válvula.

95. Un barómetro suspendido de una balanza

El extremo superior del tubo de un barómetro de cubeta está sujeto a un plato de la balanza, mientras que el otro plato sostiene unas pesas que la equilibran. ¿Se alterará el equilibrio si varía la presión barométrica?

Al contemplar el tubo barométrico suspendido de la balanza, se diría que la variación del nivel de mercurio que éste contiene no debería afectar el equilibrio de los platos, puesto que la columna de líquido está apoyada sobre el mercurio contenido en la cubeta y no influye de manera alguna en el punto de suspensión. Esto es cierto; no obstante, toda variación de la presión barométrica afectará el equilibrio del artefacto.



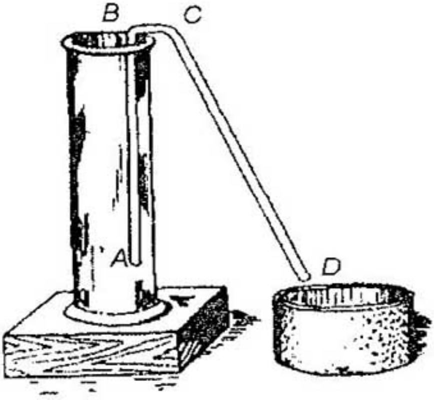
¿Oscilará la balanza si varía la presión atmosférica?

Vamos a explicar, por qué. La atmósfera presiona sobre el tubo por arriba, sin que este último le oponga resistencia alguna, ya que encima del mercurio hay un vacío. Por consiguiente, las pesas colocadas en el otro plato equilibran el tubo de cristal del barómetro y la presión que la atmósfera ejerce sobre él; como la presión atmosférica sobre la sección del tubo es exactamente igual al peso de la columna de mercurio que éste contiene, resulta que las pesas equilibran todo el barómetro de mercurio. Por ello, al variar la presión barométrica (es decir, al fluctuar el nivel del mercurio que hay en el tubo) se verá afectado el equilibrio de los platos.

Sobre este principio están basados los llamados barómetros de balanza, a los cuales se acopla fácilmente un mecanismo para registrar sus indicaciones (por ejemplo, un barógrafo).

96. El sifón en el aire

¿Cómo hay que poner a funcionar el sifón sin inclinar el recipiente y sin emplear ningún procedimiento tradicional (succionando líquido o sumergiendo el sifón en un líquido)? El recipiente está lleno casi hasta los bordes.



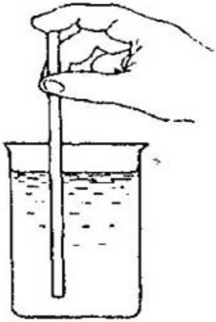
¿Existe algún procedimiento fácil para poner a funcionar este sifón?

El problema consiste en obligar al líquido a elevarse por el tubo de sifón por encima de su nivel en el recipiente y alcanzar el codo del dispositivo. Cuando el líquido pase el codo, el sifón empezará a funcionar. Esto no costará trabajo si se aprovecha la siguiente propiedad de los líquidos, muy poco conocida, de la cual vamos a hablar.

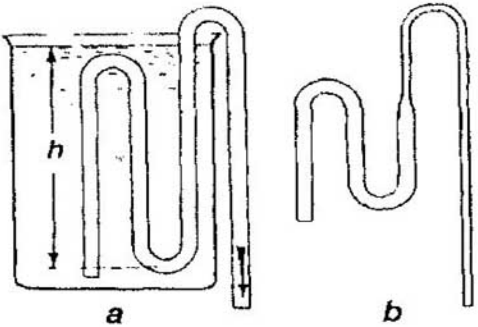
Tomemos un tubo de vidrio de un diámetro tal que se pueda tapar muy bien con un dedo.

Tapándolo de esa manera vamos a sumergir su extremo abierto en el agua. Por supuesto, el agua no podrá entrar en el tubo, mas, si se aparta el dedo, entrará de inmediato, y nos daremos cuenta de que en un primer instante su nivel estará por encima del nivel del líquido del recipiente: acto seguido los niveles de líquido se igualarán.

Vamos a explicar, por qué en un primer instante el nivel de líquido en el tubo supera el del recipiente. Cuando se aparta el dedo, la velocidad del líquido en el punto inferior del tubo es $v = \sqrt{2gH}$ (con arreglo a la fórmula de Torricelli), donde g es la aceleración de la gravedad y H, la profundidad a que está sumergido el extremo del tubo respecto al nivel de líquido del recipiente.



Mientras el líquido está subiendo por el tubo, su velocidad no disminuye por efecto de la fuerza de la gravedad, puesto que la porción que se desplaza, siempre sigue apoyada sobre sus capas inferiores en el tubo. En semejante caso no se observa lo que tiene lugar cuando arrojamos un balón hacia arriba. El balón lanzado hacia arriba participa en dos movimientos, uno ascendente, con velocidad (inicial) constante, y otro descendente, uniformemente acelerado (provocado por la fuerza de la gravedad). En nuestro tubo no tiene lugar ese segundo movimiento, ya que el agua que se eleva sigue siendo empujada por otras porciones de líquido que están subiendo.



No se necesita succionar estos sifones para ponerlos a funcionar.

En suma, el agua que entra en el tubo, alcanza el nivel de líquido del recipiente con una velocidad inicial $v = \sqrt{2gH}$. Es fácil comprender que, teóricamente, debería elevarse rápidamente a otro tanto de altura H. El rozamiento disminuye notablemente su altura de elevación. Por otro lado, también se puede aumentarla reduciendo el diámetro de la parte superior del tubo.

Por cierto, a la vista está cómo podemos aprovechar el fenómeno descrito para poner a funcionar el sifón. Tapando muy bien un extremo del sifón, el otro se sumerge en el líquido a la profundidad máxima posible (para aumentar la velocidad inicial, pues cuanto mayor es H, tanto mayor será $v = \sqrt{2gH}$). Acto seguido hay que retirar rápidamente el dedo del tubo: el agua subirá por éste superando el nivel de líquido de fuera, pasará por el punto más alto del codo y empezará a descender por otra rama; de esa manera el sifón empezará a funcionar.

En la práctica es muy cómodo aplicar el procedimiento descrito si el sifón tiene forma adecuada. En la figura **a** se aprecia un sifón de este tipo que funciona por sí mismo. Las explicaciones que acabamos de exponer permiten comprender cómo funciona. Para elevar el segundo codo, la parte correspondiente del tubo debe tener un diámetro algo menor, por lo cual el líquido que pasa del tubo ancho al estrecho, subirá a una altura mayor.

97. El sifón en el vacío

¿Funcionaría el sifón en el vacío?

A la pregunta de "¿Es posible el trasiego de líquido en el vacío mediante un sifón?" se suele responder terminantemente: "¡No, es imposible!".

Por regla general, la circulación del líquido en el sifón se atribuye únicamente a la presión del aire. Pero esta suposición es un prejuicio "físico". "En un sifón rodeado de vacío el líquido fluye libremente. En principio, el sifón con líquido funciona perfectamente aunque no exista presión del aire", dice el Prof. R.V. Pol en su libro *Introducción a la mecánica y la acústica*.

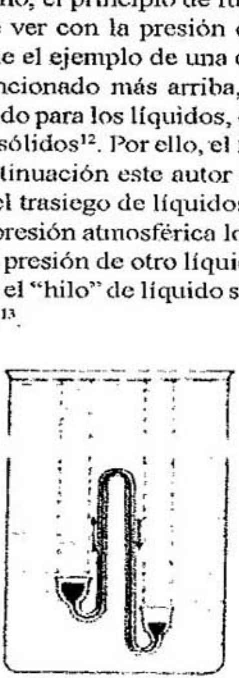
¿Cómo se explicaría, pues, el funcionamiento del sifón sin atribuirlo a la acción de la atmósfera? Para explicarlo, ofrecemos el siguiente razonamiento: la parte derecha del "hilo" de líquido contenido en el sifón es más larga y, por ende, es más pesada, por lo cual arrastra el resto de líquido hacia el extremo largo: una cuerda sostenida mediante una polea ilustra muy bien este hecho.

Ahora vamos a examinar el papel que la presión del aire desempeña en el fenómeno descrito. Ésta sólo asegura que el "hilo" de líquido sea continuo y no salga del sifón. Pero en determinadas condiciones dicho "hilo" puede mantenerse continuo únicamente merced a la adhesión entre sus moléculas, sin que intervengan fuerzas externas.

Explicación evidente de cómo funciona el sifón.

"Por lo general, el sifón deja de funcionar en el vacío, sobre todo cuando en su punto más alto hay burbujas de aire. Pero si en las paredes del tubo no hay restos de aire, al igual que en el agua contenida en el recipiente, y se maneja con cuidado el artefacto, es posible ponerlo a funcionar en el vacío. En este caso la adhesión entre las moléculas de agua garantiza la continuidad de la columna de líquido" (E. Grimsel, Curso de física).

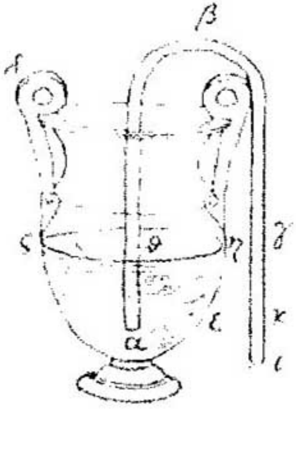
El Prof. R. Pol en su libro, citado más arriba, le apoya de una manera muy categórica diciendo lo siguiente: "Durante la enseñanza de la física elemental se suele muy a menudo atribuir el funcionamiento del sifón a la presión del aire. No obstante, esta afirmación sólo es válida con muchas restricciones. De hecho, el principio de funcionamiento del sifón no tiene nada que ver con la presión del aire". A continuación, este autor pone el ejemplo de una cuerda sostenida mediante una polea, mencionado más arriba, y prosigue: "Lo mismo también es válido para los líquidos, que se resisten a la "rotura", igual que los sólidos[12]. Por ello, el fluido no debe contener burbujas"... A continuación este autor describe una experiencia consistente en el trasiego de líquidos mediante un sifón, además, el papel de presión atmosférica lo desempeñan dos émbolos con carga, o la presión de otro líquido de densidad más baja: ésta no deja que el "hilo" de líquido se rompa aunque contenga glóbulos de aire[13].



Trasiego del mercurio mediante un sifón sumergido en aceite. La continuidad del "hilo" de mercurio en el tubo se asegura con la presión del aceite; esta última hace las veces de la presión atmosférica e impide la formación de burbujas de aire en el agua.

Es cierto que no hay nada nuevo debajo de la luna. Es que la explicación correcta del funcionamiento del sifón, que se ajusta muy bien a lo que acabamos de exponer, data de hace más de dos milenios y se remonta a Herón, mecánico y matemático de Alejandría, siglo I a.C. Este sabio ni siquiera sospechaba que el aire tiene peso, por lo cual no incurrió –a diferencia de los físicos de nuestra época– en el error que acabamos de analizar.

He aquí lo que dice: "Si el orificio libre del sifón se encuentra a la misma altura que el nivel de líquido del recipiente, no saldrá agua del sifón, aunque esté repleto... En este caso el agua estará en equilibrio. Pero si el orificio libre se encuentra por debajo del nivel de líquido, éste saldrá del sifón, puesto que la cantidad de agua del tramo $\kappa\beta$ pesa más que la del tramo $\beta\theta$ y la arrastra hacia abajo."

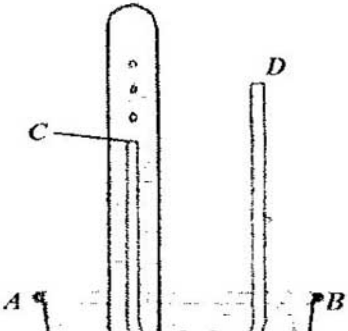


Representación del sifón tomada del tratado de Herón de Alejandría.

98. El sifón para los gases

¿Sería posible trasvasar gases utilizando un sifón?

Es posible trasegar gases mediante un sifón. Para ello es necesario que intervenga la presión atmosférica, puesto que las moléculas de los fluidos no están adheridas unas a otras. Los gases más pesados que el aire, por ejemplo, el gas carbónico, se trasvasan mediante el sifón de la misma manera que los líquidos si el recipiente del que sale gas está colocado por encima del otro. Además, también es posible trasegar aire mediante el sifón siempre que se aseguren las condiciones siguientes.



El brazo corto del sifón se introduce en una probeta ancha, llena de agua, e invertida sobre un recipiente con agua, de modo que su boca se encuentra por debajo del nivel del líquido de este último. El otro extremo *D* del sifón se tapa muy bien con un dedo para que en el tubo no entre agua al introducirlo en la probeta. Cuando se destapa el orificio D, a través del sifón empiezan a entrar glóbulos de aire en la probeta, lo cual significa que este aparato comienza a funcionar.

Para explicar, por qué el sifón introduce aire exterior en la probeta, fijémonos en que a nivel del punto C el líquido experimenta la presión de 1 at., dirigida desde abajo, mientras que desde arriba presiona una atmósfera menos el peso de la columna de agua comprendida entre los niveles C y AB. Precisamente este exceso de presión empuja el aire exterior hacia dentro de la probeta.

99. Elevación del agua mediante una bomba

¿A qué altura eleva agua una bomba de aspiración ordinaria?

¿A qué altura elevará el agua, semejante bomba?

La mayoría de los libros de texto afirman que es posible elevar agua mediante una bomba de aspiración a una altura no mayor de 10,3 m. sobre su nivel fuera de la bomba. Mas, muy raras veces se añade que la altura de 10,3 m. es una magnitud puramente teórica y es imposible de alcanzar en la práctica, ya que durante el funcionamiento de la bomba entre su émbolo y las paredes de la tubería inevitablemente se cuela aire. Además, hay que tener en cuenta que en condiciones normales el agua contiene aire disuelto (un 2 % de su volumen; véase la respuesta a la pregunta 88). Este aire se desprende al espacio vacío que se forma debajo del émbolo mientras la bomba funciona, creando cierta presión e impidiendo de esa manera que el agua suba a la altura teórica de 10,3 m. Por lo general, dicha magnitud suele ser 3 m. menor, por lo que semejantes bombas de pozo nunca elevan agua a una altura mayor de 7 m.

En la práctica, el sifón tiene casi la misma altura límite cuando se emplea para transportar agua por encima de presas o colinas.

100. La salida del gas

Bajo la campana de una bomba de aire se encuentra una botella cerrada con gas a presión normal. Si se abre la válvula de la botella, el gas saldrá al vacío con una velocidad de 400 m/s. ¿Con qué velocidad saldría el gas si su presión inicial en la botella fuera de 4 at.?

Parecería que un gas comprimido con una fuerza cuatro veces mayor debería salir con mayor velocidad. No obstante, cuando el gas sale al vacío, su velocidad de salida casi no depende de su presión. Un gas muy comprimido sale con la misma velocidad que otro, que lo esté menos. Esta paradoja física se explica por el hecho de que el gas comprimido se encuentra bajo presión alta; a su vez, la densidad del fluido que se pone en movimiento por efecto de dicha presión, también aumenta en la misma proporción (ley de Mariotte). En otras palabras, al elevar la presión, aumenta la masa del gas que se impele, además, tantas veces como crece la fuerza impulsora.

Se sabe que la aceleración de un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza aplicada e inversamente proporcional a la masa de dicho cuerpo. Por esta razón, la aceleración de salida del gas (y la velocidad que ella condiciona) no debe depender de su presión.

101. Un proyecto de motor que no consume energía

La bomba de aspiración eleva agua porque debajo de su émbolo se crea vacío. Con el vacío máximo que se realiza en la práctica, el agua sube a 7 m. Pero si durante este proceso sólo se crea vacío, para elevar agua a 1 m. y a 7 m. se necesitarán iguales cantidades de energía. ¿Sería posible aprovechar esta propiedad de la bomba de agua para crear un motor que no consumirá energía? ¿De qué manera?

El supuesto de que el trabajo invertido en elevar agua mediante una bomba de aspiración no depende de su altura de elevación, es erróneo. De hecho, en este caso sólo se invierte trabajo en practicar vacío debajo del émbolo; pero para ello se requieren diferentes cantidades de energía, según la altura de la columna de agua elevada por la bomba. Vamos a comparar el trabajo que el émbolo realiza en una carrera para elevar agua a 7 m. y a 1 m.

En el primer caso el émbolo sufre la presión de 1 at. dirigida desde arriba, o sea, soporta el peso de una columna de agua de 10 m. de altura (vamos a utilizar números enteros). Por abajo lo empuja la presión atmosférica (de 10 m. H_2O), disminuida en el peso de la columna de agua de 7 m. de altura y la elasticidad del aire desprendido del líquido y acumulado debajo de dicho elemento; por lo visto, la elasticidad del gas equivale a 3 m. de la columna de agua, puesto que la altura de 7 m. es límite. Luego para elevar agua se necesita vencer la presión de una columna de agua de

$$10 - (10 - 7 - 3) = 10 \text{ m.}$$

de altura, es decir, la presión atmosférica normal.

En el segundo caso, cuando se eleva agua a 1 m., por arriba el émbolo también sufre la presión de 1 at., mientras que la presión ejercida desde abajo es de

$$10 - 1 - 3 = 6 \text{ m.}$$

De modo que se necesita superar la presión de una columna de agua de $10 - 6 = 4$ m. Como en ambos casos la carrera del émbolo es la misma, el trabajo invertido en elevar agua a 7 m. de altura es

$$10 : 4 = 2{,}5 \text{ veces}$$

mayor que el requerido para elevarla a 1 m.

Así pues, se disipan las esperanzas de obtener un motor que no consume energía.

102. Sofocar incendios con agua hirviendo

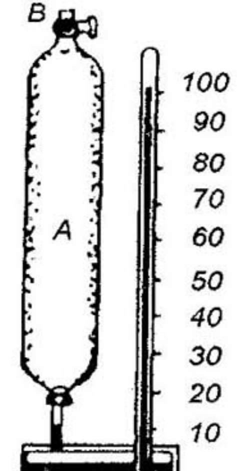
El agua hirviendo sofoca un incendio más rápido que el agua fría, pues absorbe el calor de vaporización de las llamas y las envuelve en vapor, impidiendo de esa manera el acceso de aire. ¿Sería mejor que los bomberos siempre tengan *preparadas cisternas de agua hirviendo para sofocar incendios?*

La bomba de incendios no podrá aspirar agua hirviendo, ya que debajo de su émbolo habrá vapor de 1 at. de tensión en vez de aire enrarecido.

103. Un gas contenido en un recipiente

El recipiente A contiene aire comprimido a una presión superior a 1 at. a temperatura ambiente. La columna de mercurio del manómetro indica la presión del gas comprimido. Al abrir la válvula B, ha salido cierta cantidad de gas, y la columna de mercurio del tubo manométrico ha bajado hasta la altura correspondiente a la presión normal.

Cierto tiempo después se advirtió que a pesar de que la llave permaneció cerrada, el mercurio volvió a subir. ¿Por qué?



Por supuesto, la elevación de la columna de mercurio en el manómetro comprueba que ha aumentado la presión del gas contenido en el recipiente. Es fácil comprender por qué ha crecido: al abrir la llave, el aire del recipiente se ha enfriado a consecuencia del enrarecimiento rápido, y su temperatura ha descendido por debajo de la del ambiente. Poco rato después, cuando la temperatura del gas ha vuelto a aumentar, también ha crecido su presión (con arreglo a la ley de Gay-Lussac).

104. Una burbuja en el fondo de un océano

Si cerca del fondo de un océano, a una profundidad de 8 km., se formara una burbuja, ¿subiría ésta a la superficie?

Una burbuja situada a la profundidad de 8000 m. debe de sufrir una presión de unas 800 at., pues cada 10 m. de la columna de agua equivalen aproximadamente (según el peso) a una atmósfera. La ley de Mariotte afirma que la densidad del gas es inversamente proporcional a la presión.

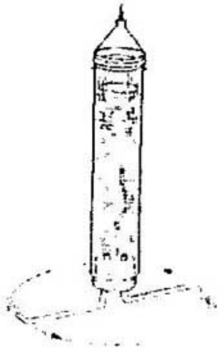
Aplicando esta ley al caso que estamos analizando, podemos concluir que la densidad del aire a la presión de 800 at. será 800 veces mayor que a presión normal. El aire que nos rodea es 770 veces menos denso que el agua. Por esta razón, el aire de la burbuja que se encuentra en el fondo de un océano debe ser más denso que el agua, por consiguiente, no podrá emerger.

No obstante, esta conclusión deriva del supuesto equivocado de que la ley de Mariotte sigue siendo válida a la presión de 800 at. Ya a la presión de 200 at. el aire se comprime 190 veces en vez de 200; a la presión de 400 at., 315 veces. Cuanto mayor es la presión, tanto más notable es la diferencia respecto de la magnitud establecida por la ley de Mariotte. A la presión de 600 at. el aire se comprime 387 veces. Si ésta sube hasta 1500 at., este gas se comprime 510 veces, y si la presión sigue aumentando, se comprimirá muy poco, como si fuera un líquido. Por ejemplo, a la presión de 2000 at. la densidad del aire sólo aumenta 584 veces en comparación con la normal, o sea, alcanza 3/4 de la densidad del agua[14].

105. La rueda de Segner en el vacío

¿Giraría la rueda de Segner en el vacío?

Los que consideran que la rueda de Segner gira a consecuencia de que el chorro de agua empuja al aire, estarán seguros de que en el vacío no girará. No obstante, dicho artefacto gira por otra causa. Su movimiento es provocado por una fuerza interna, a saber, por la diferencia de la presión que el agua ejerce sobre el extremo abierto y cerrado del tubo. Este exceso de presión no depende en absoluto del medio, dentro del cual se encuentra el dispositivo, bien sea el vacío o el aire. Por ello, en el vacío la rueda de Segner girará mejor que en el aire, pues el medio ambiente no le opondrá ninguna resistencia.



¿Giraría la rueda de Segner en el vacío?

El físico norteamericano H. Goddard realizó con éxito un experimento similar, en el cual la fuerza de retroceso de una pistola que dispara bajo la campana de una bomba de vacío pone a funcionar un diminuto tiovivo. Los cohetes vuelan en el espacio cósmico empujados por la misma fuerza de retroceso que se crea durante la salida de los gases.

106. El peso del aire seco y húmedo

¿Qué pesa más, un kilómetro cúbico de aire seco u otro de aire húmedo si las temperatura y presión son las mismas?

Es sabido que un metro cúbico de aire húmedo es una mezcla de un metro cúbico de aire seco con otro de vapor de agua. Por ello, a primera vista parece que un metro cúbico de aire húmedo pesa más que otro de aire seco y que la diferencia es igual al peso del vapor contenido en el primero.

Sin embargo, esta conclusión es errónea: el aire húmedo es más ligero que el seco. La causa consiste en que la presión de cada uno de los componentes es menor que la de toda la mezcla (el aire seco y húmedo tienen presión igual); al disminuir la presión, también se reduce el peso de cada unidad de volumen del gas. Expliquémoslo con más detalle. Designemos con f at. la presión del vapor contenido en el aire húmedo ($f < 1$). En este caso la presión del aire seco en un metro cúbico de mezcla será de $1 - f$.

Si designamos con r el peso de un metro cúbico de vapor a cierta temperatura y presión atmosférica, y con q el de un metro cúbico de aire seco, entonces, a la presión de f atmósferas

1 m^3 de vapor pesará fr ; y
1 m^3 de aire, $(1 - f)\,q$

El peso total de un metro cúbico de mezcla será igual a

$$fr + (1 - f)\, q$$

Es obvio que si $r < q$ (de hecho lo es, puesto que el vapor de agua es más ligero que el aire), entonces

$$fr + (1 - f)\, q < q\ ,$$

es decir, un metro cúbico de mezcla de aire y vapor será más ligero que otro de aire seco. En efecto, como $r < q$, serán válidas las desigualdades siguientes:

$$fr < fq \Rightarrow fr + q < fq + q\ ,$$
$$fr + q - fq < q \Rightarrow fr + (1 - f)\, q < q$$

Conque, a una misma temperatura y presión un metro cúbico de aire húmedo tiene un peso menor que otro de aire seco.

107. El vacío máximo

¿Hasta qué grado rarifican el aire las bombas modernas más eficientes?

Las bombas de vacío modernas permiten practicar un vacío de 10 at., lo cual equivale a una cienmilmillonésima de atmósfera.

En las bombillas eléctricas de vacío que funcionan largo tiempo, el grado de rarefacción del aire es similar a éste; cuanto más funcionan, tanto más se rarifica el gas que contienen: al cabo de 250 horas de estar encendidas, el aire se enrarece unas 1000 veces (debido al hecho de que las paredes y demás elementos de la ampolla atraen los iones que se forman mientras la bombilla está encendida).

108. ¿Qué es lo que se entiende por "vacío"?

¿Cuántas moléculas, aproximadamente, se quedarán en un recipiente de 1 litro de capacidad, del cual ha sido evacuado el aire mediante la bomba moderna más eficiente?

Los lectores que nunca han tratado de calcular cuántas moléculas de aire se quedan en un recipiente de 1 cm. de capacidad al disminuir 100.000.000.000 de veces la presión del aire que éste contiene, a duras penas podrán responder de alguna manera a esta pregunta. Vamos a hacer el cálculo.

A la presión de 1 at. un centímetro cúbico de aire contiene

$$27.000.000.000.000.000.000 = 27 \times 10^{18} \text{ moléculas}$$

(éste es el número de Loschmidt). Un decímetro cúbico tiene 1000 veces más: 27×10^{21}. Al disminuir la presión 100.000.000.000 (10^{11}) veces más, deberán quedar

$$\frac{27 \times 10^{21}}{10^{11}} = 27 \times 10^{10} = 270.000.000.000 \text{ moléculas}$$

He aquí su composición química:

200.000.000.000	moléculas de nitrógeno
65.000.000.000	moléculas de oxígeno
3.000.000.000	moléculas de argón
450.000.000	moléculas de gas carbónico
3.000.000	moléculas de neón
20.000	moléculas de criptón
3.000	moléculas de xenón

109. ¿Por qué existe la atmósfera?

¿A qué se debe la existencia de la atmósfera? Las moléculas de aire están o no están sujetas a la fuerza gravitatoria. Si no lo están, ¿por qué no se dispersan en el espacio vacío que rodea la Tierra? Si lo están, ¿por qué, lejos de precipitarse a la superficie terrestre, se mantienen encima de ella?

Por cierto, las moléculas de aire están sujetas a la fuerza de la gravedad a pesar de que se mueven constantemente y con gran rapidez (con la velocidad de la bala disparada). La atracción terrestre disminuye la componente de su velocidad dirigida desde la superficie terrestre, impidiendo de esa manera que las moléculas que integran la atmósfera escapen del planeta. A la pregunta de ¿por qué las moléculas que componen la atmósfera no se precipitan a la tierra? hay que contestar del modo siguiente: es que no dejan de precipitarse hacia la superficie terrestre, pero, al ser absolutamente elásticas, rebotan de sus "congéneres" que les vienen al encuentro, y de la tierra, manteniéndose siempre a cierta altura. La altitud del límite superior de la atmósfera terrestre depende de la velocidad de las moléculas más rápidas. Si bien la velocidad media de las moléculas que forman la atmósfera es de unos 500 m/s, algunas de ellas pueden moverse con mucha mayor velocidad. Son muy pocas las moléculas que tienen una velocidad siete veces mayor (de 3500 m/s), la cual les permite subir hasta una altura de km.

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{3500^2}{2 \times 9.8} \approx 600 \ km.$$

Este hecho explica la presencia de "huellas" de atmósfera a la altura de 600 km. de la superficie terrestre.

110. Un gas fue no llena todo el recipiente

¿Llenarían siempre los gases todo el espacio en que se encuentran? ¿Sería posible que un gas ocupe parte del recipiente dejando desocupada la otra?

Estamos acostumbrados a considerar que el gas siempre ocupa todo el volumen del recipiente que lo contiene. Por eso cuesta trabajo suponer, en qué condiciones un gas puede ocupar parte del recipiente, dejando libre la otra parte. Sería, pues, una absurdidad "física".

Pero no cuesta ningún trabajo "crear" mentalmente tales condiciones para que tenga lugar este fenómeno paradójico. Supongamos que disponemos de un tubo de 1000 km. de longitud colocado verticalmente respecto de la superficie terrestre, cuyo interior se comunica con el medio ambiente. La columna de aire dentro del tubo tendrá una altura de 500 a 700 km., mientras que el resto del mismo, a lo largo de cientos de kilómetros, no contendrá ningún gas, sin importar que el tubo esté abierto o cerrado. Por ello, el gas no siempre sale del recipiente abierto al espacio vacío que lo rodea. Se podría observar semejante fenómeno en un recipiente de altura mucho menor, por ejemplo, de unas cuantas decenas de metros, que contiene poco gas, en particular, pesado y a una temperatura bastante baja.