

Instituto Politécnico

Universidad Nacional de Rosario Universidad Nacional de

Hidrostática e Hidrodinámica 4^º Año

Física

fisica.ips.edu.ar
www.ips.edu.ar

Cód- 7401-19

Silvana Marini
Ignacio Evangelista
Alicia Ollva



Dpto. de Física

Masterización: RECURSOS PEDAGÓGICOS



CAPÍTULO 1

HIDROSTÁTICA

1. Introducción

Hasta este momento nos hemos concentrado en el estudio del comportamiento de los cuerpos sólidos, ya desde el punto de vista puntual, esto es, considerándolos partículas, como considerándolos cuerpos extendidos en su carácter de sólidos rígidos. En este punto comenzaremos el estudio del comportamiento de sistemas compuestos por fluidos. Por fluido vamos a entender a los líquidos y a los gases, para ello vamos a repasar las características que distinguen cada una de los estados de agregación en que una sustancia se puede encontrar.

En general los cuerpos de la naturaleza, que necesariamente están constituidos por sustancias, se clasifican según su estado de agregación, en sólidos, líquidos y gases; diferenciándose entre sí por sus características macroscópicas y microscópicas, cuyas propiedades se indican brevemente en el cuadro que sigue desde el punto de vista microscópico o sea considerando la estructura atómico - molecular del mismo.

En el primer curso de mecánica se abordó el estudio de algunos fenómenos físicos recurriendo a modelos; el modelo de partícula, el modelo de sistema de partículas, el modelo del sólido rígido. Por medio de cada uno de ellos se pudieron abordar múltiples situaciones físicas diferentes como si fuera una sola. Ahora vamos a considerar un nuevo modelo para analizar otro tipo de situación física, el caso de los fluidos.

Recordemos que las sustancias se encuentran en la naturaleza en tres fases típicas: sólida, líquida y gaseosa con las siguientes características microscópicas que se detallan

Características microscópicas:	Gases	Líquidos	Sólidos
Movimiento molecular predominante	Traslación Rotación sobre su propio eje	Vibración Pueden trasladarse o deslizarse	Vibran alrededor de un punto fijo
Fuerzas de cohesión entre moléculas	Muy débiles	Mayores que en los gases	Muy intensas
Espacios entre moléculas	Grandes (aproximadamente diez veces el diámetro molecular)	Intermedias Varían de uno a seis diámetros moleculares (de acuerdo a su densidad)	Muy pequeñas (aproximadamente un diámetro molecular)

Física IV

Desde el punto de vista macroscópico, considerando esencialmente las características forma y volumen de los cuerpos tenemos:

Características macroscópicas	Gases	Líquidos	Sólidos
Forma	No tienen forma propia, adquieren las del recipiente que las contiene (si es cerrado)	No tienen forma propia. Como las moléculas pueden deslizarse, los líquidos se derraman y fluyen modificando su forma	La forma permanece constante. Como las fuerzas de cohesión son muy intensas, carecen de movimiento molecular de traslación.
Características macroscópicas	Gases	Líquidos	Sólidos
Volumen	No tienen volumen propio. Como las fuerzas de cohesión son muy débiles, las moléculas se pueden separar fácilmente ocupando un volumen cada vez mayor	Tienen volumen propio. La intensidad de las fuerzas de cohesión, no permite que las moléculas se separen y mantienen el volumen constante	Tienen volumen propio

No siempre es posible una clasificación estricta, pues hay sustancias cuya inclusión en uno u otro grupo es dudosa, por ejemplo el vidrio y la brea son líquidos que fluyen tan lentamente que se comportan como sólidos. Por otra parte un sólido que se encuentra en estado pulverulento, como la arena o el talco, se adapta a la forma del recipiente y no por eso pasa a ser un líquido. Otro caso son los plasmas, gases altamente ionizados, que no se ajustan a las categorías mencionadas y a menudo se los llama el *cuarto estado de la materia* pero no será motivo de nuestro estudio.

El hecho de que una sustancia sea sólida, líquida o gaseosa, depende del grado con el que las fuerzas entre sus moléculas determinan su estructura; pudiendo cambiar su estado de agregación si se modifican ciertas condiciones físicas que alteren el valor de dichas fuerzas. Como ejemplo familiar de esto tenemos el agua común que se puede encontrar en fase sólida y la llamamos hielo, o líquida o gaseosa.

El estudio de los fluidos lo haremos en varias etapas, estudiando primero los líquidos y posteriormente analizaremos los gases. En el estudio de los líquidos abordaremos primero los líquidos en reposo, que es la parte de la mecánica de los fluidos llamada



hidrostática o estática de fluidos, y en la siguiente nos ocuparemos del estudio de los líquidos en movimiento, la *hidrodinámica*.

Los líquidos son prácticamente incompresibles; se necesitan grandes fuerzas para lograr pequeñas variaciones de volumen, en nuestro análisis consideraremos siempre a los líquidos incompresibles (o sea que consideraremos que cualquiera sea el tipo de fuerza que se les aplique su volumen permanece constante). Para el estudio de los fluidos debemos considerar algunas magnitudes nuevas que no hemos usado hasta el momento.

1.2.1. Densidad

Todos sabemos que el plomo es más “pesado” que la madera, sin embargo no tenemos dificultad en sostener con la mano una pequeña plomada de pesca y no es fácil para nadie, a menos que sea un atleta, sostener con la mano un tablón de madera del tamaño que se emplean en los andamios de las construcciones. Indudablemente que el tablón es más pesado que la plomada. Lo que la gente quiere significar, cuando dice “el plomo es más pesado que la madera” es que si se tienen dos cuerpos de igual tamaño y uno es de madera y el otro de plomo, sumergidos en el mismo campo gravitatorio, el cuerpo de plomo resulta más pesado. Para poder evaluar numéricamente esta propiedad y poder comparar estas características propias de las distintas sustancias sin necesidad de construir cuerpos de igual tamaño establecemos una relación numérica entre la masa de cada uno de los cuerpos y el volumen que ocupan y a esa magnitud, que asociamos a la sustancia, llamamos densidad.

Es importante tener en cuenta que para calcular la densidad necesitamos un cuerpo al que le podamos medir la masa y el volumen pero lo que obtenemos es una propiedad de la sustancia que constituye el cuerpo y no del cuerpo mismo.

Matemáticamente, entonces la densidad es el cociente entre la masa de un cuerpo y su volumen.

$$\delta = m / V$$

Como la masa la medimos en [kg] y el volumen en [m³] la unidad de densidad se indicará en [kg/ m³]

Al realizar este proceso experimental se obtiene la densidad media, si el material es homogéneo ésta coincide con la del material. Si por el contrario el objeto tiene huecos, como un queso o la miga de pan la densidad media no coincide con la del material.

1.2.2. Peso específico

Generalmente se trabaja con la densidad, pero, de modo análogo, si lo que se considera es la relación entre el peso del cuerpo y su volumen lo que se obtiene es el *peso específico*

$$\rho = P / V$$

La unidad con que se mide esta magnitud es [N / m³]

Física IV

DENSIDADES DE ALGUNOS MATERIALES

Sustancia	Densidad (kg/m³)	Sustancia	Densidad (kg/m³)
Espacio interestelar	10 ⁻¹⁸ a 10 ⁻²¹	Sol, promedio	1.41 X 10 ³
Hidrógeno*	0.090	Cloroformo	1.53 X 10 ³
Oxígeno	1.43	Azúcar	1.6 X 10 ³
Helio	0.178	Magnesio	1.7 X 10 ³
Aire seco (30°C)	1.16	Hueso	(1.5-2.0) X 10 ³
Aire seco (0°C)	1.29	Arcilla	(1.8-2.6) X 10 ³
Espuma de estireno	0.03 X 10 ³	Marfil	(1.8-1.9) X 10 ³
Madera de balsa	0.12 X 10 ³	Vidrio	(2.4-2.8) X 10 ³
Corcho	(0.2-0.3) X 10 ³	Cemento	(2.7-3.0) X 10 ³
Madera de pino	(0.4-0.6) X 10 ³	Aluminio	2.7 X 10 ³
Madera de encina	(0.6-0.9) X 10 ³	Mármol	2.7 X 10 ³
Éter	0.74 X 10 ³	Diamante	(3.0 - 3.5) X 10 ³
Alcohol etílico	0.79 X 10 ³	Luna	3.34 X 10 ³
Acetona	0.79 X 10 ³	Planeta Tierra, promedio	5.25 X 10 ³
Aguarrás	0.87 X 10 ³	Hierro	7.9 X 10 ³
Benceno	0.88 X 10 ³	Níquel	8.8 X 10 ³
Mantequilla	0.9 X 10 ³	Cobre	8.9 X 10 ³
Aceite de oliva	0.92 X 10 ³	Plata	10.5 X 10 ³
Hielo	0.92 X 10 ³	Plomo	11.3 X 10 ³
Agua (0°C)	0.99987 X 10 ³	Mercurio	13.6 X 10 ³
Agua (3.98°C)	1.000 00 X 10 ³	Uranio	18.7 X 10 ³
Agua (20°C)	1.001 80 X 10 ³	Oro	19.3 X 10 ³
Asfalto	1.02 X 10 ³	Tungsteno	19.3 X 10 ³
Agua de mar	1.025 X 10 ³	Platino	21.5 X 10 ³
Plasma sanguíneo	1.03 X 10 ³	Osmio	22.5 X 10 ³
Sangre entera	1.05 X 10 ³	Pulsar	10 ⁸ - 10 ³
Madera de ébano	(1.1-1.3) X 10 ³	Materia nuclear	~10 ¹⁷
Caucho duro	1.2 X 10 ³	Núcleo de estrella neutronica	~10 ¹⁸
Ladrillo	(1.4-2.2) X 10 ³	Agujero negro (1 masa solar)	10 ¹⁹

* Los gases están a 0° C y a presión atmosférica.



1.2.3. Densidad relativa

En la práctica cotidiana de la industria, la medición de densidad de una sustancia se suele establecer, no de manera absoluta, esto es midiendo la masa y el volumen de una muestra de la sustancia considerada sino de modo relativo, esto es, comparando la densidad de la muestra con la densidad de otra sustancia, y a ese valor obtenido se le llama *densidad relativa*. Esta magnitud es utilizada con frecuencia en la práctica. Por carencia de elementos de laboratorio adecuados y porque el proceso de medición es más rápido.

Así se define la densidad relativa como el cociente entre la densidad (δ) de una sustancia y la de otra (δ') tomada como referencia. Generalmente se toma la densidad del agua destilada a 4 °C como referencia.

$$\delta_R = \delta / \delta'$$

Como puede observarse se trata de una magnitud adimensional.

1.2.4. Presión

Cuando jugamos en la pileta de natación con una pelota y deseamos sumergirla es muy difícil, tenemos que hacer una fuerza importante y si la pelota es grande, para lograrlo, necesitamos de la ayuda de un amigo. Por otra parte en cuanto dejamos de hacer fuerza la pelota sube inmediatamente a la superficie. Hay otros objetos que son más fáciles de sumergir como un ladrillo, o un ancla y otros que son imposibles de sumergir como un transatlántico o una colchoneta inflable.

Así algunos objetos que tienen poco peso como una llave o una moneda se sumergen fácilmente y otros con mucho peso como un barco no lo hacen. En otros casos, objetos “livianos” como una pelota o colchoneta inflable flotan con facilidad.

Los que mencionamos más arriba no son los únicos fenómenos relacionados con la inmersión en los líquidos. Es más fácil sostener un objeto pesado dentro del agua que fuera de ella. Cuando buceamos pareciera que nos apretaran los tímpanos. Éstos y muchos otros ejemplos nos indican que un líquido en equilibrio ejerce una fuerza sobre un cuerpo sumergido. Pero, ¿qué origina esa fuerza?, ¿en qué dirección actúa?, ¿también el aire en reposo ejerce fuerza sobre los cuerpos?,' ¿qué determina que un cuerpo flote o no? Éstas son algunas de las cuestiones que aborda la hidrostática.

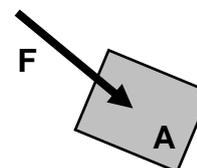
Un fluido en reposo en contacto con la superficie de un sólido ejerce fuerza sobre todos los puntos de dicha superficie. Esto ocurre tanto con las paredes del sólido que contiene al fluido como contra la superficie de cualquier sólido que esté sumergido en el fluido, esto se puede mostrar realizando un experimento simple. Si se llena de líquido una botella de plástico con orificios en sus paredes se ve que los chorritos de agua salen en dirección perpendicular a las paredes. Esto muestra que *la dirección de la fuerza que el líquido ejerce en cada punto de la pared es siempre perpendicular a la superficie de contacto*.



Física IV

En el estudio de los fluidos, resulta necesario conocer cómo es la fuerza que se ejerce en cada punto de las superficies, más que el valor de la fuerza en sí misma. Una persona acostada o parada sobre una colchoneta aplica la misma fuerza en ambos casos (su peso). Sin embargo, la colchoneta se hunde de manera distinta cuando se concentra la fuerza sobre la pequeña superficie de los pies. Si alguien recibe un pisotón con el talón de un zapato común sufrirá una pequeña molestia, si en cambio lo recibe con un taco tipo aguja puede recibir un daño importante aunque la persona que lo lleva sea más liviana. El peso de la persona se reparte entre los puntos de la superficie de contacto: cuanto menor sea esta superficie, más fuerza corresponderá a cada punto. Para poder comparar estos efectos se define una nueva magnitud que establece una relación entre el módulo de la fuerza ejercida y la superficie sobre la que se aplica. Esta magnitud es la presión

Se define la **presión** como el cociente (o relación) entre el módulo de la fuerza ejercida perpendicularmente, a una superficie (F) y el área (A) de la misma



$$p = F/A \quad [N]/[m^2] = [Pa]$$

La fuerza se mide en newton y la superficie en metros cuadrados; la unidad de presión resultante se llama pascal. Antiguamente se utilizaban otras unidades para medir la presión y en algunas profesiones queda el recuerdo de eso, así los médicos indican los valores de las mediciones de presión arterial en centímetros de mercurio y las estaciones de servicio la presión del aire en las cámaras de los neumáticos en libras por pulgada cuadrada.

Cuando buceamos, la molestia que sentimos en los oídos a una cierta profundidad no depende de cómo orientemos la cabeza: el líquido ejerce presión sobre nuestros tímpanos independientemente de la inclinación de los mismos. *La presión se manifiesta como una fuerza perpendicular a la superficie, cualquiera sea la orientación de ésta.*

1.3. Principio de Pascal

La característica estructural de los fluidos hace que en ellos se transmitan presiones, a diferencia de lo que ocurre en los sólidos, que transmiten fuerzas. Este comportamiento fue descubierto por el filósofo, físico y matemático francés Blaise Pascal (1623-1662), quien estableció el siguiente principio:

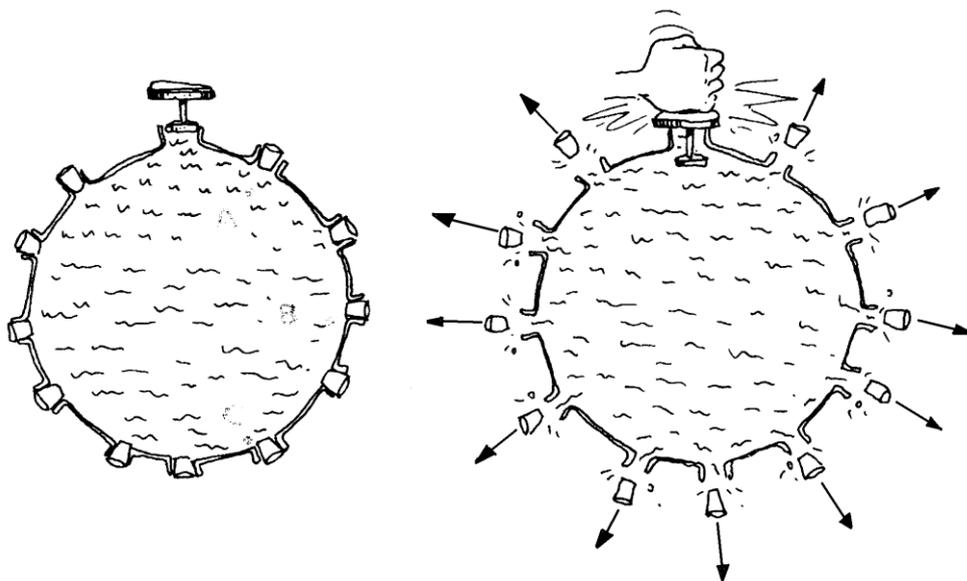
Un cambio de presión aplicado a un fluido en reposo dentro de un recipiente se transmite sin alteración a través de todo el fluido. Es igual en todas las direcciones y actúa mediante fuerzas perpendiculares a las paredes que lo contienen.

En la figura se recurre a una esfera que está recubierta con tapones y tiene un émbolo por medio del cual se puede aumentar la presión del líquido contenido en su interior.



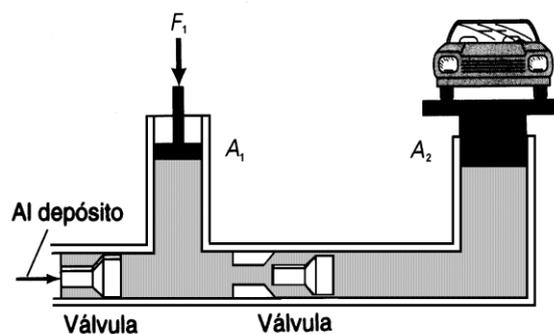
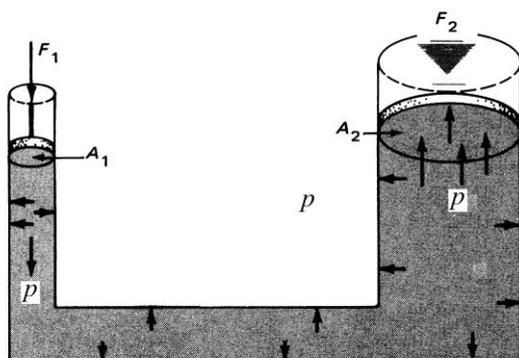
Cuando se aumenta la presión a que está sometido el líquido, este aumento se transmite a todo el volumen, por esta razón todos los tapones se ven sometidos a la misma presión y saltan juntos.

El principio de Pascal, fundamenta el funcionamiento de las genéricamente llamadas **máquinas hidráulicas**, que funcionan aplicando este principio.



1.3.1. Prensa hidráulica

Este dispositivo, llamado **prensa hidráulica**, ejemplifica el funcionamiento de muchos artefactos que se diseñaron aplicando el principio de Pascal; la prensa, el gato, el freno, el ascensor y la grúa, entre otras, permiten con cambios de montaje, prensar objetos, levantar pesos, estampar metales, etc. ejerciendo fuerzas muy pequeñas por un lado y obteniendo fuerzas muy grandes por el otro. Veamos cómo lo hace.



Física IV

El recipiente lleno de líquido de la figura consta de dos cilindros de diferente sección con dos pistones en los extremos que tiene un ajuste perfecto capaces de resbalar libremente dentro de los cilindros comunicados entre sí. Si se ejerce una fuerza F_1 sobre el pistón pequeño, la presión ejercida se transmite, tal como lo observó Pascal, a todos los puntos del fluido incompresible dentro del recinto originando fuerzas perpendiculares sobre las paredes. Nos interesa la presión que se ejerce sobre el pistón grande (A_2) que origina una fuerza F_2 de manera que mientras el pistón de menor diámetro baja, el de mayor sube. La presión sobre los pistones es la misma pero la fuerza es diferente

como
$$p_1 = p_2$$

entonces
$$F_1 / A_1 = F_2 / A_2$$

y por lo tanto
$$F_2 = F_1 \cdot (A_2 / A_1)$$

Consideremos, por ejemplo, que la relación entre la superficie del pistón grande y del chico es de diez a uno, entonces el módulo de la fuerza obtenida en él será diez veces mayor que la que se ejerce sobre el pistón chico.

Si, siguiendo con este ejemplo, analizamos que ocurre con el volumen desplazado, vemos que cuando el pistón chico se desplaza diez unidades de longitud, el grande sólo lo hará una unidad. Así cuando vemos levantar un automóvil con un gato hidráulico notamos que el operario debe realizar muchos bombeos para levantar muy poco el vehículo. Esto es porque este dispositivo no crea energía. Lo que ocurre es que el trabajo mecánico realizado sobre el pistón chico tiene que ser igual al que efectúa el grande.

1.4. Teorema fundamental de la hidrostática

En los líquidos la presión aumenta con la profundidad, las paredes de los diques se construyen con un espesor mayor hacia la base, para sumergirse unos pocos metros basta con una máscara de buceo pero para hacerlo a grandes profundidades se requieren equipos especialmente diseñados para resistir las grandes presiones.

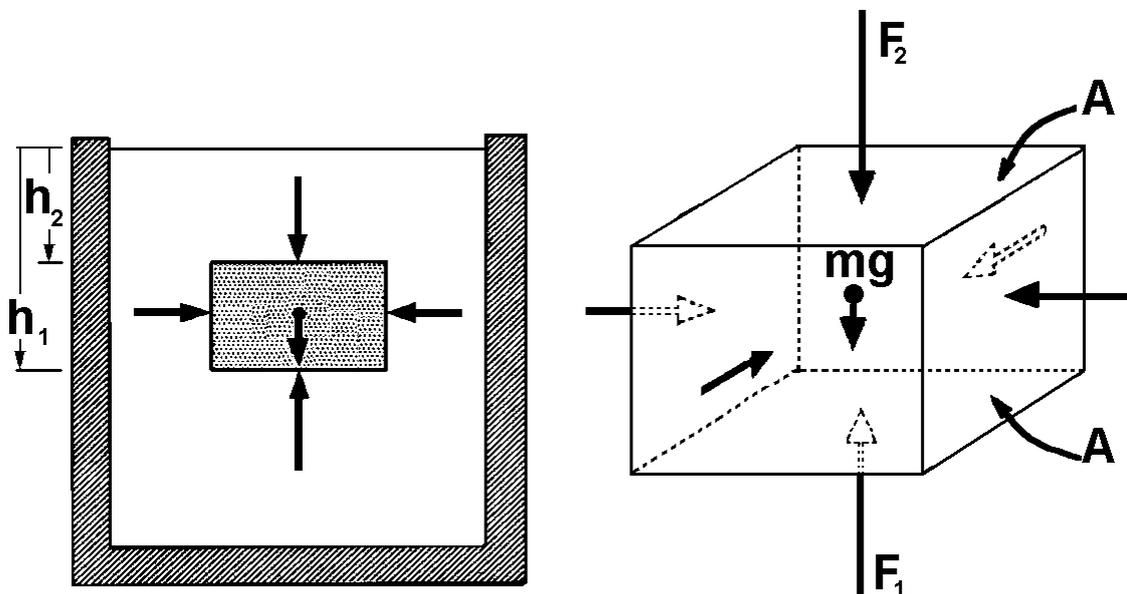
Vamos a deducir una expresión matemática que nos permita calcular la variación de la presión con la profundidad. Para ello, consideremos un recipiente con un líquido de densidad δ en reposo.

Se puede, entonces, aislar imaginariamente una parte del líquido y analizar las fuerzas que actúan sobre él. Considérese un paralelepípedo regular de líquido con superficie de la base horizontal A , ubicado a una profundidad arbitraria, como se muestra en la figura.

Si realizamos el diagrama de cuerpo libre de este volumen de líquido. Se ve que está sometido a la acción de fuerzas laterales que ejerce el mismo líquido. Pero como el



cuerpo se encuentra en reposo necesariamente las fuerzas laterales se equilibran entre sí. Por otra parte las fuerzas verticales se pueden agrupar en tres:



- La fuerza F_1 resultante de la totalidad de las fuerzas que realizan las capas inferiores de líquido y que sostiene el cuerpo. Como son las fuerzas que sostienen al cuerpo su dirección es de abajo hacia arriba.
- El peso del cuerpo que suponemos concentrado en el centro de masa del mismo y cuyo módulo es igual a la masa del cuerpo por el valor de la gravedad en el lugar (mg).
- La fuerza F_2 , resultante del peso de las capas superiores de líquido que actúa sobre el cuerpo. su dirección es de arriba hacia abajo.

Si aplicamos la ley de Newton a este cuerpo en equilibrio resulta

$$\sum F_y = m \cdot a_y$$

Pero en nuestro caso como el sistema se encuentra en reposo la aceleración es cero, y la ecuación queda:

$$\sum F_y = F_1 - F_2 - m \cdot g = 0$$

Como la fuerza F_1 que actúa sobre la parte inferior del cuerpo es igual al producto de la presión p_1 existente a esa profundidad del líquido por la sección A de la base del cuerpo. De manera similar la fuerza F_2 que actúa sobre la cara superior es igual a la presión p_2 por la sección A .

A su vez la masa de este volumen de líquido es igual al producto de la densidad del líquido por el volumen, de lo que resulta:

Física IV

$$F_1 = p_1 A$$

$$F_2 = p_2 A$$

$$m = V \delta = (h_1 - h_2) A \delta$$

Reemplazando estos valores en la sumatoria de fuerzas y simplificando finalmente queda

$$\sum F_y = F_1 - F_2 - m \cdot g = p_1 A - p_2 A - (h_1 - h_2) A \delta g = 0$$

$$p_1 - p_2 = (h_1 - h_2) \delta g$$

Que es el resultado final del Teorema General de la Hidrostática. La diferencia de presiones entre dos puntos de una masa líquida depende de la densidad del líquido y de la diferencia de altura entre ambos puntos.

Si los puntos 1 y 2 se encuentran a igual profundidad la diferencia de alturas es igual a cero es por esto que *dos puntos de un fluido a igual profundidad estarán a igual presión*. Recordemos que este teorema vale para líquidos en reposo, si los líquidos estuvieran en movimiento, como el agua de un arroyo o la que corre por las cañerías de distribución, este movimiento se debe justamente a la existencia de diferencias de presiones en distintos puntos de un mismo nivel.

Si se considera el punto 2 en la superficie ($h_2 = 0$) el teorema da el valor de la presión sobre la superficie a una profundidad arbitraria h pero por sobre la superficie de líquido está actuando la presión que ejerce la columna de aire atmosférico, que también es un fluido, la llamada presión atmosférica. Entonces la presión total ejercida sobre la superficie de profundidad h es la debida a la presión de la columna del líquido más la presión que ejerce el aire sobre la columna. Es decir:

$$p = p_{\text{atmosférica}} + p_{\text{líquido}} = p_{\text{atmosférica}} + \delta g h$$

Así otra expresión del teorema general de la hidrostática es

$$p = p_o + \delta g h$$

donde con p_o indicamos la presión atmosférica existente en ese momento y lugar (veremos que la presión atmosférica varía no sólo en los distintos lugares del planeta sino que, por cambios climáticos, también temporalmente) con p indicamos la presión absoluta existente sobre la superficie de profundidad h , que es el resultado del efecto sumado de la presión atmosférica más la presión originada por la columna de líquido. Se denomina presión relativa o manométrica al término $\delta g h$ o sea que es la diferencia entre las presión absoluta y la atmosférica.

Cuando un neumático de automóvil está completamente desinflado, el medidor de presión de la estación de servicio indica cero. Sin embargo, la presión en su interior es la presión atmosférica. La escala del medidor de presión indica, en el caso del neumático, la presión relativa entre el interior y el exterior. Cuando la presión relativa es cero, la presión absoluta es igual a la presión atmosférica.



1.5. Presión atmosférica

En un gas, las moléculas están muy separadas, moviéndose a gran velocidad, colisionando de manera elástica caóticamente. Esta agitación frenética hace que los gases se expandan hasta ocupar todo el volumen disponible en el recipiente que los contiene y si ocurriese que el recipiente que los contiene tiene un orificio, el gas se difunde en todo el espacio. Es lo que ocurre cuando se pincha una cámara de bicicleta

La Tierra, como otros planetas, está envuelta por una capa de gases a la que llamamos **atmósfera**, la nuestra está compuesta en su mayor parte por **nitrógeno** (78%) y **oxígeno** (21%). Las moléculas de aire activadas energéticamente por la energía que llega del Sol no escapan al espacio porque el campo gravitatorio de la Tierra restringe su expansión. Como consecuencia de eso no encontramos sumergidos en un "océano de aire", una capa gaseosa que recubre el planeta igual a como lo hace un líquido, *el peso del aire sobre la superficie terrestre ejerce una presión, la presión atmosférica*. Esta capa de aire es tan fina que si comparamos la Tierra con una manzana la capa de aire tiene el mismo espesor respecto del diámetro terrestre que la cáscara de la manzana respecto del tamaño de la manzana.

A diferencia de los líquidos, los gases son compresibles: como su densidad puede variar, las capas superiores de la columna de aire comprimen a las más bajas, en los lugares más profundos de la atmósfera, es decir a nivel del mar, el aire es más denso, y a medida que subimos se va enrareciendo, hasta que se desvanece a unos 40 km de altura. La capa baja, la **troposfera**, presenta las condiciones necesarias para la vida y es donde se producen los fenómenos meteorológicos. Mide 11 km y contiene el 80 % del aire total de la atmósfera.

La presión atmosférica es de $1,013 \times 10^5$ Pa o, como lo indican los informes meteorológicos, 1013 hPa (hectopascal), este valor es, dentro de ciertos límites, variable por los efectos climáticos que afectan a la atmósfera: movimiento de las masas de aire, originando los vientos, vapor de agua incrementando la humedad ambiente, etc.

El valor de presión atmosférica normal es un valor muy alto, pero no notamos su presencia y esto se debe a que el desarrollo de la vida sobre la Tierra a lo largo de millones de años desarrollo mecanismos biológicos que producen una presión interior que compensa la presión exterior originada por la atmósfera. Los trajes de los astronautas, además de proveer el aire necesario para respirar, tienen que mantener artificialmente la presión sobre el cuerpo del astronauta; si el traje se le rompiera y perdiera la presión, al no estar compensada la presión interior del astronauta, por una presión exterior, este estallaría.

Este mecanismo se emplea para realizar la **esterilización por vacío** para eliminar los microorganismos de una muestra (alimento, instrumental, etc.), se la coloca en un recipiente del cual se extrae el aire. La presión exterior es reducida y los fluidos internos de las bacterias, que estaban sometidas a la presión atmosférica, se expanden, haciendo que éstas estallen.

Se puede realizar un experimento con una botella de plástico del tipo de las de gaseosa para poder apreciar los efectos de la presión atmosférica. Primero se la coloca destapada en un recipiente con agua caliente sin permitir que el agua se introduzca en

Física IV

ella. Esto hará que el aire del interior de la botella se caliente, se dilate y se expanda saliendo de la misma. Después de diez o quince minutos, sin retirar la botella del agua caliente, se coloca la tapa y se cierra lo más herméticamente posible. A partir de allí se deja enfriar la botella, si se desean ver los efectos más rápido se puede enfriar bajo el chorro de agua fría de una canilla. Cuando el aire que ha quedado en el interior de la botella se enfríe disminuirá la presión interior y la presión exterior compactará la botella aplastándola.

Al apretar una sopapa contra una superficie pulida se aplasta y queda sin aire. Cuando, por acción de las fuerzas elásticas, la sopapa recupera su forma inicial, queda un vacío parcial en el interior y la presión atmosférica exterior la mantiene adherida a la pared. Del mismo modo, las patas de las moscas tienen pequeñas ventosas que les permiten caminar por paredes y techos sin caer al piso.

El funcionamiento del gotero obedece al mismo fenómeno. Al apretar la perilla de goma creamos un vacío parcial. Cuando sumergimos el tubito en el líquido y soltamos la perilla, la presión atmosférica que se ejerce sobre la superficie libre del líquido lo obliga a subir por el tubo hasta la región de menor presión dentro de la perilla.

El filósofo y físico italiano Evangelista Torricelli no compartía la concepción aristotélica de que la naturaleza tiene horror al vacío (horror vacui) y que siempre llenaría todos los intersticios donde este pudiera aparecer. Para ello no solo realizó vacío, sino que además desarrolló, en 1643, un método para medir la presión atmosférica. Para hacerlo colocó mercurio en un tubo de vidrio, de aproximadamente un metro de longitud, cerrado por uno de sus extremos, hasta llenarlo.

Luego con el extremo tapado, invirtió el tubo y sumergió este extremo en un recipiente abierto que también contenía mercurio y manteniendo el tubo vertical. Cuando destapó el tubo, observó que la columna líquida bajaba hasta tener una altura de casi 76 cm, por encima del nivel de mercurio del recipiente. Como por la forma en que realizó el experimento, no pudo entrar aire a la parte superior del tubo lo que allí había, era vacío. Por otra parte la presión atmosférica al actuar sobre la superficie libre del líquido del recipiente impedía que la columna de mercurio continuara descendiendo. Así comenzó a medir la presión atmosférica en altura de la columna de mercurio.

Es a partir de este experimento y de los aparatos que se construyeron, que durante mucho tiempo, se midió la presión atmosférica en cm de mercurio, y los médicos aún lo hacen.

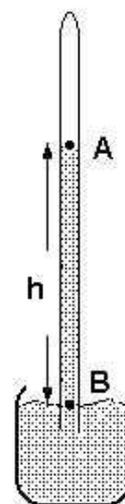
Si se aplica el Teorema General de la Hidrostática a dos puntos A y B del mercurio, de tal forma que A esté dentro del tubo en la superficie libre del mismo y B en la superficie libre del mercurio de la cubeta, será

$$p_B - p_A = \delta g h$$

En el punto A, la presión es prácticamente nula, pues sólo hay vapores de mercurio; en el punto B, la presión es la atmosférica, por lo tanto:

$$p_{atm} = \delta_{Hg} g h$$

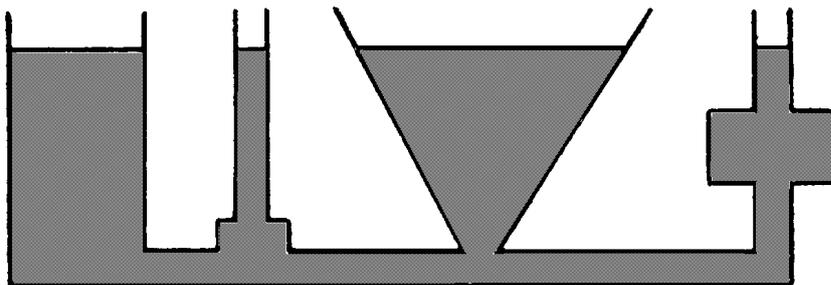
Conocida la altura del mercurio en el tubo, se puede calcular la presión atmosférica.





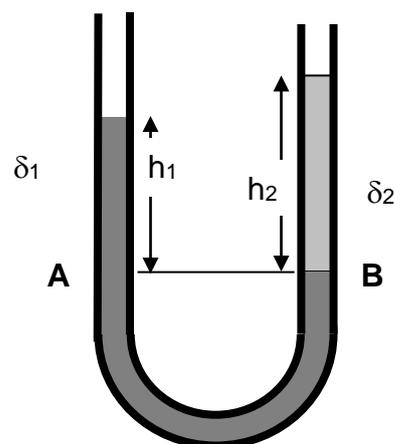
1.6. Vasos comunicantes

Una de las consecuencias del teorema general de la hidrostática es que permite explicar el fenómeno de vasos comunicantes. Como la presión sólo depende de la profundidad la altura que el agua alcanza en un sistema de recipientes interconectados, como el que se muestra en la figura, es igual para todos, independiente de la forma de los recipientes y de la cantidad de líquido en cada uno de ellos.



Esta propiedad permite también construir un dispositivo de vasos comunicantes para medir la densidad de un líquido conociendo la densidad de otro no miscible (que no se mezcla) con el primero.

Consideremos un tubo en U, que tradicionalmente es de vidrio pero puede ser una manguera de plástico transparente, en el que se coloca agua por un extremo y otro líquido cuya densidad se desea determinar y que no se mezcle con el agua por el otro extremo, por ejemplo aceite, colocando cantidades de líquido adecuado se logra que en una rama haya una columna de un único líquido como se puede apreciar en la figura



El teorema general de la hidrostática nos asegura que en todos los puntos que estén a igual profundidad y se encuentre por debajo de la línea horizontal A B estarán a igual presión ya que el líquido es el mismo de densidad δ_1 , por tal motivo en la capa límite de separación entre ambos líquidos la presión p_B será igual a la presión p_A del punto A que se encuentra en la otra rama al mismo nivel. Pero aplicando el teorema general de la hidrostática para calcular cada una de estas presiones resulta:

$$p_A = p_0 + \delta_1 \cdot g \cdot h_1$$

$$p_B = p_0 + \delta_2 \cdot g \cdot h_2$$

Como $p_A = p_B$ igualando ambas ecuaciones y simplificando, queda:

$$\delta_1 \cdot h_1 = \delta_2 \cdot h_2$$

De donde la densidad del líquido dos queda expresada en términos de la densidad del líquido uno y de las respectivas alturas

$$\delta_2 = (\delta_1 \cdot h_1) / h_2$$

Física IV

1.7. Barómetro

El barómetro es un aparato que permite medir la presión atmosférica. Existen distintos tipos, los más comunes son los de mercurio, basados en el experimento de Torricelli. En la actualidad también se utilizan barómetros metálicos (aneroides), de fácil transporte, ya que no contienen líquido, pues su funcionamiento se basa en las variaciones de curvatura que sufre una lámina ondulada, que cubre una caja de la cuál se ha extraído el aire.

Los barómetros son instrumentos muy sensibles y de múltiples aplicaciones: las alteraciones atmosféricas que preceden a una tempestad afectan a la presión atmosférica y son detectadas por el barómetro anunciando la tormenta. Se usan también como altímetros, ya que la presión atmosférica disminuye notablemente a medida que ascendemos a grandes alturas, es por eso que se colocan en los tableros de instrumentos de los aviones.

1.8. Manómetro

El manómetro es un instrumento que se utiliza para medir la presión de un gas contenido en un recipiente. Al igual que los barómetros los hay de dos tipos: los de mercurio y los metálicos.

El manómetro de mercurio de tubo abierto: consiste en un tubo en forma de U que contiene un líquido, de tal manera que un extremo del tubo está abierto a la atmósfera y el otro está conectado al depósito que contiene al gas cuya presión p se quiere medir.

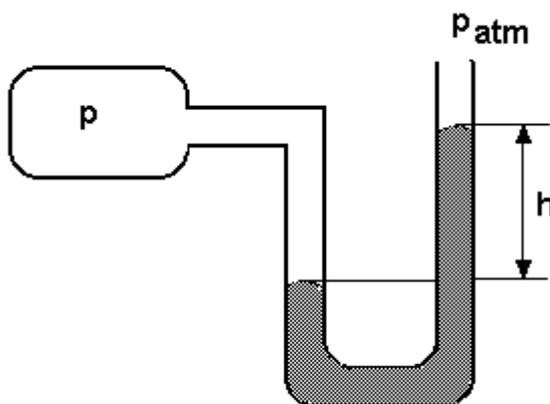
En los gases, la densidad es comparativamente pequeña, entonces la diferencia de presiones en los distintos puntos dentro del recipiente es despreciable. En un recipiente que contenga algún gas, podemos considerar a la presión, uniforme en todos sus puntos.

Aplicando el Teorema General de la Hidrostática al líquido manométrico, tomando un punto en la superficie libre de la rama abierta y otro en la superficie libre que está en contacto con el gas, se tiene:

$$p - p_{atm} = \delta g h$$

La presión manométrica $p - p_{atm}$ es proporcional a la altura h (diferencia de alturas entre las dos ramas del tubo en U).

Conocida la presión atmosférica (medida con un barómetro) se puede determinar la presión absoluta del gas contenido en el recipiente.





1.9. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

1.9.1. Los hemisferios de Magdeburgo

Luego que Torricelli confirmara la posibilidad de la existencia de vacío se comenzaron a fabricar bombas para producir vacío, Otto von Guericke construyó la primera bomba de vacío práctica dos años después del experimento de Torricelli, en 1645. Era una bomba de agua modificada con piezas lo bastante bien ajustadas para evitar que el aire exterior ingrese. Con ello realizó la primera medida de la densidad del aire ya que pesó una esfera con aire primero y luego después de haber hecho accionar su bomba de vacío. La diferencia de masas se debió al aire extraído; conociendo el volumen interior de la esfera, el cálculo de la densidad fue inmediato.

Realizó otros experimentos cuando su bomba de vacío le permitió obtener el vacío en recintos de dimensiones importantes; mostró que las velas no podían arden en ausencia de aire, que los animales morían y confirmó una hipótesis efectuada por Aristóteles dos mil años antes: que el sonido no se puede propagar en ausencia de aire. Lo comprobó al agitar una campanilla en el interior del recinto donde se había efectuado el vacío.

Pero el experimento más conocido de los ejecutados por von Guericke, lo realizó en el año 1654 en presencia del emperador cuando realizó el vacío entre dos semiesferas de unos sesenta centímetros de diámetro unidas sólo con una capa de grasa y dos grupos de ocho caballos tiraron con todas sus fuerzas sin poder separarlas. Con esto mostró la importancia de la presión atmosférica.

Como von Guericke era el alcalde de la localidad de Magdeburgo estas esferas pasaron a la historia con el nombre de esa ciudad y no de su inventor.

Tabla de algunas presiones características (en Pa):

10^{-27}	Presión del hidrógeno intergaláctico (la menor que existe)
10^{-14}	Espacio interplanetario
10^{-12}	Menor presión de vacío que puede obtenerse en laboratorio
10^{-16}	Presión a 480 km de altura
10^{-2}	Presión parcial del hidrógeno atmosférico
10^{-1}	Presión en un tubo de TV
10	Presión del sonido de intensidad dolorosa (100 decibeles)
10^2	Presión de una bomba de vacío mecánica, sin bomba difusora
10^3	Presión del gas domiciliario
$1,6 \times 10^4$	Presión sistólica (máxima) de la sangre humana
$0,3 \times 10^4$	Presión del agua domiciliaria
10^5	Presión atmosférica normal
10^6	Cilindro de motor de auto
10^7	Presión en matafuegos, calderas y tubos de aire de buzos
10^8	Presión en la profundidad oceánica, o la de un puñetazo
10^9	Presión a la que se congela el agua a cien grados, o la que pueden hacer los dientes
10^{10}	Presión a la que el carbono puede adquirir la estructura del diamante
10^{16}	Presión en el centro del Sol
10^{34}	Presión en el centro de las estrellas más densas del universo

Física IV

1.9.2. Efectos de la presión en los buzos

Hay dos inconvenientes graves en el buceo de gran profundidad cuando no se usa batiscafo, submarino u otra envoltura rígida que soporte la presión hidrostática, y se usa sólo un traje blando para protegerse del frío. Uno de ellos ocurre al descender y el otro al subir.

El buzo necesita de aire a la misma presión que la del agua de las profundidades donde trabaja; de otro modo, para respirar, tendría que hacer enormes esfuerzos de inhalación. Aunque la presión de los fluidos del cuerpo aumente para equilibrar a la presión exterior. Cuando la sangre se encuentra a mayor presión los gases del aire resultan más solubles en ella. Un buzo a veinte o treinta metros de profundidad tiene gran cantidad de oxígeno y nitrógeno disueltos en la sangre.

Cuando el buzo asciende la presión disminuye y la sangre libera el exceso de gas que ya no puede mantener disuelto; ese gas forma burbujas que obstruyen la circulación y sobrevienen trastornos por embolia gaseosa. Un descenso brusco de la presión del aire produce una disminución de la solubilidad de los gases en solución, y por tanto los gases disueltos retornan al estado gaseoso dentro de la corriente sanguínea, formando burbujas de aire.

Estas burbujas de aire liberadas dentro de la corriente sanguínea pueden obstruir algunos de los vasos terminales (arteriolas), interrumpiendo el aporte sanguíneo a las terminaciones nerviosas, desencadenándose así los síntomas que se producen a consecuencia de cuadros isquémicos (infartos) en diferentes zonas, cerebrales, óseas, renales, etc. El oxígeno y el dióxido de carbono vuelven a su estado soluble dentro de la sangre con rapidez, pero el nitrógeno permanece en estado gaseoso y es por tanto el principal responsable de esta enfermedad.

Para que este fenómeno no ocurra se pide a los nadadores submarinos que el ascenso se haga lentamente, en etapas, de modo que se de tiempo a que la presión interna del cuerpo equilibre a la presión exterior. En los casos que no se hace eso el paciente debe ser presurizado inmediatamente en una cabina especial a bordo, y despresurizarse muy lentamente hasta la presión atmosférica normal.

1.10. Empuje.

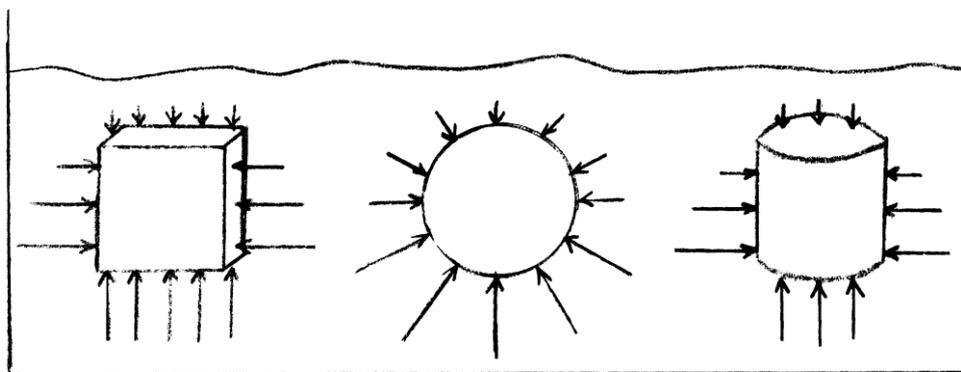
1.10.1. Principio de Arquímedes

Todos estamos familiarizados con la experiencia de colocar algunos objetos en el agua y observar que algunos flotan y otros no, hasta podemos, en general, hacer anticipaciones, los objetos de madera esperamos que floten y los metálicos que se hundan. Pero un transatlántico es grande, pesado y metálico y flota sin dificultad o al menos es lo que los pasajeros esperan. Además hay objetos que por su forma o material nos es difícil anticipar si van a flotar o no.

Es evidente que cada vez que un cuerpo se sumerge en un fluido es empujado de alguna manera por el mismo. A veces esa fuerza es capaz de sacarlo a flote y otras sólo logra provocar una aparente pérdida de peso. Pero, ¿Cuál es el origen de esa fuerza de empuje? ¿De qué depende su intensidad?



Sabemos que la presión hidrostática aumenta con la profundidad y conocemos también que se manifiesta mediante fuerzas perpendiculares a las superficies sólidas que contacta. Esas fuerzas no sólo se ejercen sobre las paredes del contenedor del líquido sino también sobre las paredes de cualquier cuerpo sumergido en él.



Vamos a aplicar el teorema general de la hidrostática para determinar las fuerzas que los líquidos ejercen sobre los cuerpos sumergidos o semisumergidos. En la figura se ve un cuerpo semisumergido en un líquido, éste ejerce una presión sobre la superficie de las paredes del cuerpo que se manifiesta mediante fuerzas perpendiculares a las superficies.

Las fuerzas horizontales que se ejercen sobre las paredes laterales del cuerpo son de valores crecientes con la profundidad por el aumento de presión. Pero para cada profundidad las fuerzas aparecen de pares y opuestas por lo que se equilibran.

Las fuerzas verticales que actúan sobre el cuerpo son su propio peso ($m.g$), la fuerza que sobre la superficie superior ejerce la atmósfera ($p_0 A$) y la fuerza que las capas inferiores del líquido ejercen sobre la cara inferior del cuerpo ($p A$). Como el sistema está en reposo la sumatoria de fuerzas verticales debe ser igual a cero, en consecuencia;

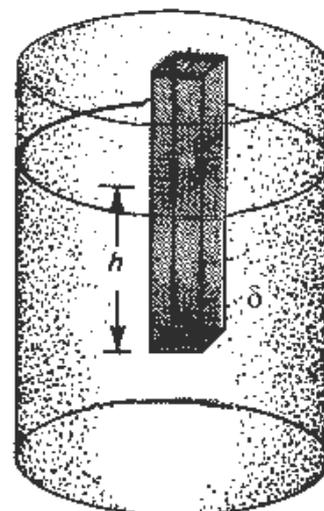
$$\sum F_y = (p A) - (p_0 A) - m.g = 0$$

Pero de acuerdo al teorema general de la hidrostática la presión p sobre la cara inferior del cuerpo es

$$p = p_0 + \delta g h$$

Reemplazando en la ecuación y simplificando queda,

$$\sum F_y = \delta g h A - m.g = 0$$



Física IV

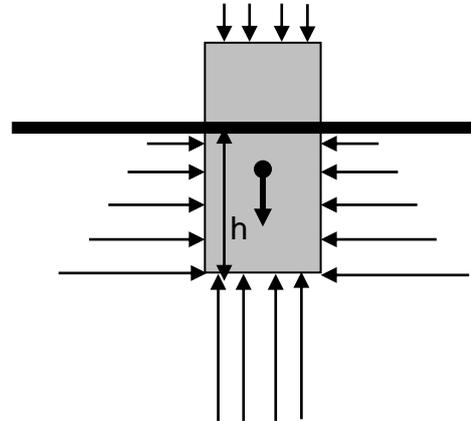
Pero el producto $(h A)$ es el volumen de la parte del cuerpo que se encuentra sumergida, (V_{sum})

$$\sum F_y = \delta g V_{sum} - m.g = 0$$

$$\delta g V_{sum} = m.g = \delta_{cuerpo} V_{cuerpo} g$$

$\delta g V_{sum} = E$ (empuje) ; siendo δ la densidad del líquido en el cuál se encuentra sumergido el cuerpo estudiado

Entonces el peso del cuerpo en reposo resulta equilibrado por una fuerza de abajo hacia arriba que realizan las capas de líquido que se encuentran por debajo de la cara inferior y cuyo valor es igual al peso del volumen de líquido desalojado. Estas fuerzas que realiza el líquido y que siempre actúan de abajo hacia arriba se llaman, por tradición, fuerzas de empuje o simplemente empuje $E = \delta g V_{sum}$



Este es el enunciado del llamado Principio de Arquímedes que no es tal sino una consecuencia del teorema general de la hidrostática.

Es importante señalar que el *volumen sumergido* del cuerpo, es lo que determina el empuje. Un cuerpo de gran volumen sumergido recibirá un gran empuje; un cuerpo de volumen pequeño, un empuje pequeño.

“Un cuerpo sumergido (total o parcialmente) en un fluido, recibe un Empuje vertical y hacia arriba igual al peso del volumen de líquido desplazado”.

1.10.2. Flotación

La flotación es un fenómeno que se observa cotidianamente. Un barco flota, un submarino puede navegar en la superficie y sumergirse en las profundidades de ríos y mares; los dirigibles y globos aerostáticos flotan en el aire. Este comportamiento depende de la relación que existe entre el peso de los cuerpos y el empuje que aplican los fluidos.

Encuentra las relaciones entre el empuje y el peso del cuerpo sumergido para las siguientes situaciones:

- el objeto se va al fondo del recipiente
- el objeto flota a dos aguas (queda en reposo, totalmente sumergido, en la posición que se lo deje)
- el objeto flota parcialmente sumergido

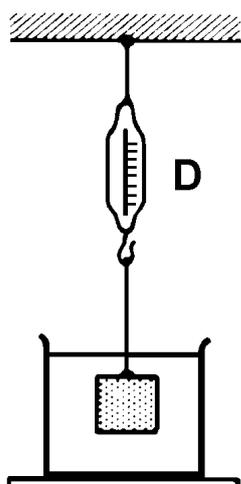
En todos los casos nos referimos a situaciones de reposo de los cuerpos considerados.



1.10.3. Peso aparente.

Cuando se suspende un cuerpo de un dinamómetro éste indica su peso pero cuando el cuerpo se encuentra parcial o totalmente sumergido en un líquido el dinamómetro indica la diferencia entre el peso del cuerpo en el aire y el empuje que recibe del líquido en el que se encuentra.

El valor D indicado por el dinamómetro es siempre igual a la tensión T. Si el cuerpo está sumergido sólo en aire la sumatoria de fuerzas es



$$\sum F_y = T - m \cdot g = 0$$

$$T = m \cdot g$$

Donde $m \cdot g$ es el peso del cuerpo

Si en cambio el cuerpo se encuentra parcial o totalmente sumergido en un líquido hay que considerar el empuje E

$$\sum F_y = T + E - m \cdot g = 0$$

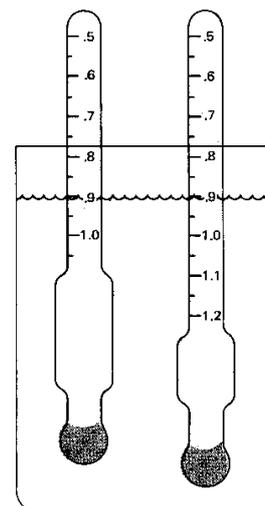
de donde

$$T = m \cdot g - E$$

El valor que indica en este caso el dinamómetro se llama peso aparente y es menor que el peso del cuerpo en el aire ya que se resta el empuje que efectúa el líquido sobre el cuerpo.

1.10.4. Densímetro.

Son instrumentos basados en el principio de Arquímedes, que se utilizan para medir la densidad de los líquidos. Se construyen con un tubo de vidrio cerrado herméticamente y lastrado en la parte inferior con mercurio o municiones de metal para que cuando se los introduzca en un líquido queden flotando en posición vertical. Se calibran de manera de poder leer la densidad en la división que enrasa con la superficie libre del mismo.



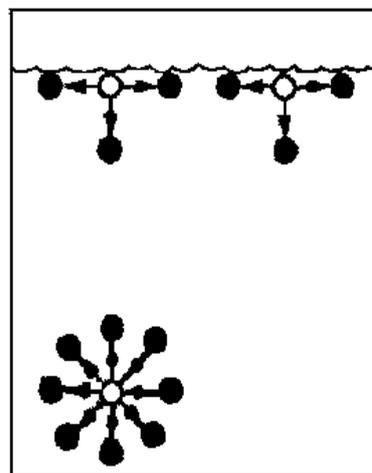
1.11. Cohesión y adhesión

Existen algunos insectos que pueden caminar sobre el agua gracias a la **tensión superficial**. Seguramente alguna vez lanzaron una piedra al ras de la superficie de un lago para hacerla rebotar varias veces antes de que se hunda (efecto "sapito"). Un experimento simple que podemos realizar es colocar con cuidado un broche para papel recubierto de plástico y observaremos que flota, mientras que un broche similar que

Física IV

tiene el metal no recubierto difícilmente flote. ¿Cómo se explican estos comportamientos? Esto se debe a un efecto que ocurre en la superficie límite de dos medios y que se llama tensión superficial.

Ya sabemos que las moléculas en los líquidos no están firmemente ligadas entre sí, se mantienen más o menos atraídas por fuerzas llamadas de cohesión. Una molécula en el seno de un líquido ejerce y recibe fuerzas de cohesión en todas las direcciones y sentidos, de manera que, al promediarse, estas fuerzas dan una resultante nula. Sobre una molécula en la superficie libre del líquido, en cambio, las fuerzas no se compensan, pues no hay una distribución simétrica de líquido alrededor de ella. Las fuerzas de interacción entre las moléculas *disminuyen al aumentar la distancia entre las partículas*. Podemos considerar, entonces, que sólo ejercen fuerzas sobre una molécula de la superficie del líquido las otras que están ubicadas dentro de una semiesfera imaginaria, centrada en ella. La resultante de esta semiesfera de fuerzas de cohesión tendrá, por la simetría de la distribución, dirección perpendicular a la interfase y sentido hacia el interior del líquido.



La capa superficial del líquido se comporta, entonces, como si fuera una membrana elástica tensa (como el parche de un tambor) que, análogamente, almacena un tipo de energía superficial (relacionada con el trabajo que habría que realizar para apartar una molécula de dicha superficie). La fuerza que tensa la membrana se denomina **tensión superficial**.

La fuerza de atracción de los líquidos con los sólidos vecinos se denomina **fuerza de adhesión**. La adhesión entre el agua líquida y el vidrio limpio, es mayor que la cohesión entre agua y agua. Debido a esto, el agua dentro de un recipiente de vidrio no se dispone de manera exactamente horizontal, sino que, en los bordes, el nivel es un poco más alto que en el centro, aumentando la superficie de contacto con el vidrio. Se dice que el agua "moja" al vidrio.

Si el recipiente es suficientemente angosto, la superficie del líquido forma un **menisco cóncavo**, por el contrario, si las fuerzas de cohesión son mayores que las de adhesión, como en el caso del mercurio y el vidrio, entonces el menisco que se forma es convexo.

Por esta misma razón, cuando derramamos agua sobre un vidrio plano, el líquido se extiende formando una delgada capa, aumentando así lo más posible la superficie de contacto. En cambio, si derramamos mercurio sobre el vidrio, se formarán pelotitas, que es la distribución que hace mínima la superficie de contacto.

El agua dentro de un tubo delgado, de diámetro pequeñísimo, sube empujada por la fuerza de adhesión con las paredes. Este fenómeno se conoce con el nombre de **capilaridad** (del latín *capilaris*, cabello), y se observa, por ejemplo, en la savia que sube por los tallos de los vegetales; en la humedad que asciende desde el piso por las paredes de una casa o en la cera derretida de una vela que sube por el pabilo que arde en su extremo.



Cuestiones

- 1) Encuentra la relación que existe entre la densidad y el peso específico.
- 2) Averigua qué factores pueden modificar los valores de la densidad y del peso específico de una sustancia.
- 3) Expresa la densidad del agua en: kg / m^3 , kg / dm^3 y g / cm^3
- 4) Explica como funciona el mecanismo del mate, si realmente hacemos “vacío”, como suele decirse, cuando sorbemos con la boca.
- 5) Un gran peligro para los submarinos es apoyarse en fondos arcillosos ya que si esto llega a ocurrir queda adherido al fondo y no puede emerger sin ayuda exterior. ¿puedes explicar porqué?
- 6) Mientras el mercurio es un material caro y contaminante el agua es barata y no contamina ¿porqué no se hacen los barómetros con agua en el interior en lugar de mercurio?

Problemas

(■) Problemas para trabajar en clase

- 1) Dada la densidad de cada uno de los siguientes materiales, calcula el peso específico, el peso específico relativo y la densidad relativa:

$\delta^1 = 13\,600 \text{ kg/m}^3$	R: $\rho_1 = 1.33 \cdot 10^5 \text{ N/m}^3$	$\rho_{1r} = 13.6$	$\delta_{1r} = 13.6$
$\delta^2 = 8\,900 \text{ kg/m}^3$	R: $\rho_2 = 8.72 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$	$\rho_{2r} = 8.9$	$\delta_{2r} = 8.9$
$\delta^3 = 900 \text{ kg/m}^3$	R: $\rho_3 = 8.82 \cdot 10^3 \text{ N/m}^3$	$\rho_{3r} = 0.9$	$\delta_{3r} = 0.9$

- 2) (■) La masa de 1 litro de leche es 1,02 kg. La nata que contiene ocupa el 4 % del volumen y tiene una densidad relativa 0,865. Calcula la densidad de la leche desnatada.

$$\text{R: } \delta^R = 1026 \text{ kg/m}^3$$

- 3) Con los siguientes datos determina cuáles de las afirmaciones dadas a continuación son correctas y cuáles no:

$$\text{Cuerpo A: } m = 16 \text{ g, } V = 4 \text{ cm}^3$$

$$\text{Cuerpo B: } \delta = 800 \text{ kg/m}^3, V = 2 \text{ cm}^3$$

$$\text{Cuerpo C: } m = 12 \text{ g, } V = 4 \text{ cm}^3$$

$$\text{Cuerpo D: } m = 12 \text{ g, } V = 3 \text{ cm}^3$$

- a) Los cuerpos C y D tienen la misma masa y por lo tanto igual densidad.
- b) Los cuerpos A y C son del mismo material.
- c) Si el cuerpo D tuviese el mismo volumen que el A, su masa sería de 16 g.
- d) Los cuerpos A y B tienen la misma masa.

$$\text{R: a) f } \quad \text{b) f } \quad \text{c) v } \quad \text{d) f}$$

- 4) (■) Un prisma de granito mide 0,5 m, 1 m y 2 m de aristas. Su masa es de 2 600 kg. ¿Cuáles son la mínima y la máxima presión que puede ejercer sobre el suelo?

$$\text{R: } p_{\min} = 12740 \text{ Pa } \quad p_{\max} = 50960 \text{ Pa}$$

- 5) Determina el aumento en la presión de un fluido en una jeringa hipodérmica cuando la enfermera aplica una fuerza de 42 N al pistón, cuyo radio es de 1,1 cm.

$$\text{R: } p = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Física IV

6) Una persona de 85 kg camina sobre la nieve. Calcula la presión que ejerce sobre ésta cuando:

- a) Se apoya sobre un pie, siendo la cantidad de superficie de la suela 250 cm²
- b) De desliza sobre esquíes de forma rectangular de 2,60 m de largo y 0,082 m de ancho.

R: a) 33320 Pa b) 3907 Pa (un esquí)

7) (■) Una pileta de 8 m de largo y 5 m de ancho contiene agua hasta una altura de 3 m. Calcula:

- a) La presión en el fondo de la pileta.
- b) La fuerza ejercida por el agua y en el fondo de la pileta.

R: $p_f = 130700 \text{ Pa}$ $F = 5.23 \cdot 10^6 \text{ N}$

8) (■) Expresa la presión atmosférica normal en Pa y en hPa. ¿Qué altura alcanzará la columna de líquido si Torricelli hubiera decidido realizar su experimento con agua en lugar de mercurio?

R: $h = 10.336 \text{ m}$

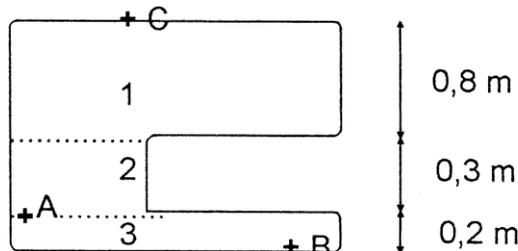
9) El séptimo piso de una casa de departamentos está a 20 m de altura. Sus canillas requieren para funcionar una presión de 2 000 hPa. ¿A qué altura sobre el nivel de la calle debe estar el depósito?

R: $H_{\text{suelo}} = 30 \text{ m}$

10) Un vehículo ha caído en el lecho de un río ($\delta_r = 1,02$) a una profundidad de 4 m. Si se intenta abrir la puerta ¿se podrá? El vehículo es hermético y la superficie de la puerta cubre 1 m².

R: $F = 141284 \text{ N}$

11) En la figura se muestra la sección de un recipiente que contiene tres líquidos diferentes. Calcula la presión hidrostática en los puntos A, B y C:



- Líquido 1 → $\delta_1 = 0,89$ R: $p_A = 9682.4 \text{ Pa}$
- Líquido 2 → $\delta_2 = 0,92$ R: $p_B = 12152 \text{ Pa}$
- Líquido 3 → $\delta_3 = 1,26$ R: $p_C = 0 \text{ Pa}$

12) (■) Un tubo en U contiene mercurio. Si en su rama derecha se vierte agua hasta alcanzar una altura de 10 cm, ¿a qué altura se eleva el mercurio en la rama izquierda a partir de su nivel inicial?

R: $h = 0.367 \text{ cm}$

13) El líquido de un manómetro de tubo abierto es mercurio, está conectado a un recipiente que contiene un gas. Las alturas de sus ramas son 3 cm y 8 cm, siendo la rama abierta la de mayor altura.

- a) ¿Cuál es la presión absoluta en el fondo del tubo en U?
- b) ¿Cuál es la presión manométrica del gas?
- c) ¿Cuánto vale la presión absoluta del gas?

R: a) 111962.4 Pa b) 6664 Pa c) 107964 Pa



14) (■) Los diámetros de las secciones de los émbolos de una prensa hidráulica son 4 cm y 24 cm respectivamente. Calcula:

- a) La relación de diámetros. R: a) 1/6
b) La relación de superficies. b) 1/36
c) La relación de presiones. c) 1
d) La relación de fuerzas. d) 1/36
e) La relación de recorridos de los émbolos. e) $x_2/x_1 = 1/36$

15) Un bloque cuyo peso específico relativo es 5,8 tiene un volumen de 0,2 m³. ¿Cuál es su peso en vacío (o en aire)? ¿Cuál es su peso totalmente sumergido en un líquido de peso específico relativo 0,8?

R: $P_{\text{aire}} = 11368 \text{ N}$ $P_{\text{aparente}} = 9800 \text{ N}$

16) Un bloque de metal es pesado en: a) aire, b) la mitad sumergido en agua, c) totalmente sumergido en agua y d) totalmente sumergido en una solución de sal y agua. Se obtuvieron, no en este orden, 5 N, 8 N, 10 N y 6 N. ¿Cuál es el peso del bloque? ¿Cuál es el peso aparente que corresponde a cada caso?

R: $P_{\text{bloque}} = 10 \text{ N}$ P_{aparente} : a) 10 N, b) 8 N, c) 6 N d) 5N

17) Un anillo de oro pesa 0,088 N en el aire y 0,083 N en el agua. ¿Puede ser de oro puro?

R: $\delta = 16981.13 \text{ kg/m}^3$ y $\delta_{\text{Au}} = 19300 \text{ kg/m}^3$ No es de oro puro

18) (■) Un bloque cúbico de acero ($\delta_r = 7,8$) de 10 cm de arista flota sobre mercurio.

- a) ¿Qué fracción del bloque se encuentra por encima de la superficie del mercurio?
b) si se vierte agua sobre la superficie del mercurio, ¿qué espesor ha de tener la capa de agua para que su superficie alcance justamente la cara superior del bloque de acero?

R: a) 42.65 % b) $h_{\text{agua}} = 0.046 \text{ m}$

19) Un bloque cúbico de madera de 10 cm de arista de densidad 500 kg/m³ flota en un recipiente con agua. Se vierte en el recipiente aceite de densidad 800 kg/m³ hasta que la superficie superior de la capa de aceite se encuentre a 4 cm por debajo de la cara superior del bloque.

- a) ¿Qué espesor tiene la capa de aceite?
b) ¿Cuál es la presión manométrica en la cara inferior del bloque?

R: a) 0,05 m b) 490 Pa

20) Un densímetro tiene 60 cm de longitud y 1 cm² de sección. Colocado en agua pura se sumerge 54 cm y en ácido sulfúrico sólo 30 cm. ¿Cuál es el peso específico del ácido sulfúrico? ¿Cuál es el valor del empuje del agua y del ácido sulfúrico?

R: a) 17640 N / m³ b) $E_{\text{agua}} = 0,529 \text{ N}$ $E_{\text{ácido sulfúrico}} = 0,529 \text{ N}$

21) (■) Un globo aerostático tiene un volumen de 10³ m³ y pesa desinflado 4000 N. Calcula el empuje que le ejerce el aire cuando se lo llena de helio y la aceleración que adquiere cuando se lo suelta. $\delta_{\text{helio}} = 0,178 \text{ kg/m}^3$ $\delta_{\text{aire}} = 1,300 \text{ kg/m}^3$

R: $E = 12740 \text{ N}$ $a = 11,93 \text{ m/s}^2$

Física IV

TRABAJO PRÁCTICO

Título: *Principio de Arquímedes*

Objetivos:

Verificar el Principio de Arquímedes.

Verificar la relación entre empuje y volumen sumergido del cuerpo.

Introducción teórica:

Un cuerpo parcial o totalmente sumergido en un fluido, experimenta una fuerza de abajo hacia arriba, llamada empuje, equivalente al peso (del volumen) del fluido desalojado.

Cuando se suspende un cuerpo de un dinamómetro, éste indica su peso, pero cuando el cuerpo se encuentra parcial o totalmente sumergido en un líquido el dinamómetro indica la diferencia entre el peso del cuerpo en el aire y el empuje que recibe del líquido en el que se encuentra.

El valor indicado por el dinamómetro es siempre igual a la tensión T . Si el cuerpo está sumergido sólo en aire la sumatoria de fuerzas es:

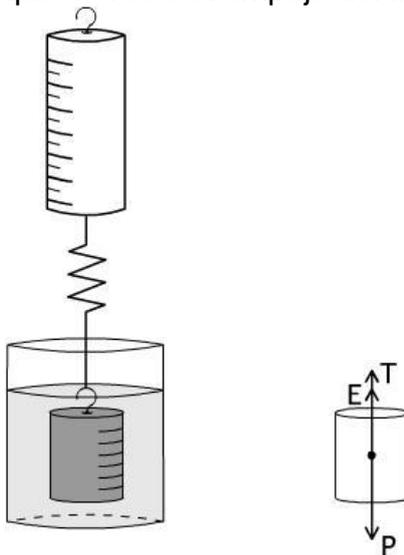
$$\sum F_y = T - m \cdot g = 0 \Rightarrow T = m \cdot g$$

Donde: $m \cdot g$ es el peso del cuerpo (P).

Si en cambio el cuerpo se encuentra parcial o totalmente sumergido en un líquido hay que considerar el empuje E .

$$\sum F_y = T + E - m \cdot g = 0 \quad \text{de donde: } T = m \cdot g - E$$

El valor que indica en este caso el dinamómetro se llama peso aparente y es menor que el peso del cuerpo en aire, ya que se resta el empuje del líquido sobre el cuerpo.



Siendo: P : peso del cuerpo (en el aire)
 T : peso del cuerpo sumergido (en el fluido)
 V_s : volumen sumergido
 δ : densidad del fluido
 E : empuje ($E = P - T = \delta V_s g$)



Datos: $\delta_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\delta_{\text{aire}} = 1,29 \text{ kg/m}^3$

Materiales:

Cuerpos de sección regular (con una tira adherida de papel milimetrado donde se marcaron las distintas alturas), probeta (o recipiente), calibre, dinamómetro, soporte de altura variable, regla milimetrada, papel milimetrado, agua

Procedimientos:

- 1- Utiliza el dinamómetro para medir el peso de un cuerpo en el aire;
- 2- Registra el valor medido;
- 3- Calcula la sección del cuerpo a sumergir;
- 4- Sumerge en agua, el cuerpo colgado del dinamómetro, hasta los niveles marcados en el mismo y finaliza con el cuerpo totalmente sumergido;
- 5- Para cada marca mide T y calcula el E correspondiente y el V_s ;
- 6- Realiza una tabla de valores;
- 7- Grafica en papel milimetrado E en función de V_s , en unidades del SI y utilizando una escala adecuada;
- 8- Analiza la gráfica y saca conclusiones;
- 9- Analiza las fuentes de incertezas y propón cómo disminuirlas.

Preguntas orientadoras:

Las preguntas orientadoras sirven como guía para el análisis de los resultados y la elaboración de las conclusiones.

1. ¿Por qué despreciamos el empuje del aire? Justifica conceptual y numéricamente.
2. ¿Qué ocurriría si se utilizara otra sustancia que no fuera agua?
3. ¿Cómo cambiarían los resultados obtenidos si se modificara la aceleración de la gravedad?

El informe debe contener:

- Introducción teórica.
- Materiales utilizados, indicando características de cada instrumento de medición.
- Desarrollo del procedimiento.
- Observaciones.
- Tabla de valores.
- Desarrollos matemáticos.
- Gráfica de E en función de V_s con la escala debidamente indicada. Análisis de la gráfica: ¿Qué relación sugiere la gráfica que hay entre las variables representadas? En otras palabras, ¿con qué tipo de función relacionarías los puntos?
- Análisis de las fuentes de incertezas.
- Conclusiones (deben incluir el resultado final del trabajo con su correspondiente incerteza)

CAPÍTULO 2 HIDRODINÁMICA

2.1. Fluidodinámica. Tipos de flujo

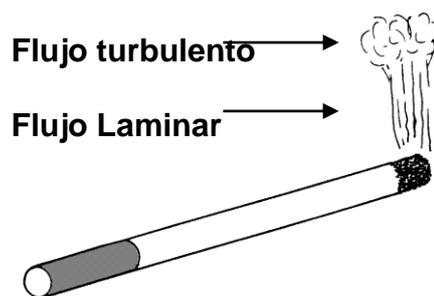
En el capítulo anterior se analizó el comportamiento de los líquidos en condiciones de reposo, éste, en cambio estará dedicado al estudio de los fluidos en movimiento. Estamos familiarizados con ellos; el agua que nos llega a través de la distribución domiciliar o la sangre que circula por nuestras venas, son un tipo de fluido, los líquidos; en cambio el aire que fluye por nuestros pulmones y el viento son otro tipo de fluido, los gases. Algunos de los aspectos que vamos a considerar en este capítulo se refieren a ambos tipos de fluidos, otros se concentrarán sólo en uno de ellos, pero en todos los casos analizaremos las consideraciones necesarias para esclarecer con qué tipo de fluido estamos tratando en cada caso.

En el movimiento de los fluidos se pueden distinguir dos tipos de flujo: **laminar y turbulento**. Es laminar cuando las pequeñas porciones de fluido se mueven ordenadamente, manteniendo una estructura de capas regulares que no se cruzan entre sí, en cambio el flujo turbulento se caracteriza por un movimiento desordenado de las distintas partes del fluido formando muchos remolinos.

Un ejemplo de flujo laminar lo tenemos cuando se vuelca miel desde un recipiente y un ejemplo de movimiento turbulento lo tenemos casi en toda vez que vemos un fluido en movimiento, el agua de los arroyos, la que fluye por las acequias de riego, el humo del cigarrillo que sale de la boca, etc.

Estos tipos de flujo no necesariamente se dan en situaciones muy distantes; si observamos un cigarrillo encendido apoyado en un cenicero, vemos que al principio el humo asciende suavemente en una fina columna sin entremezclarse; pero luego, en un punto más alto, la columna se rompe y el humo se difunde en el aire circundante de manera irregular y retorcida. La parte lisa de este flujo es laminar y la arremolinada es turbulenta.

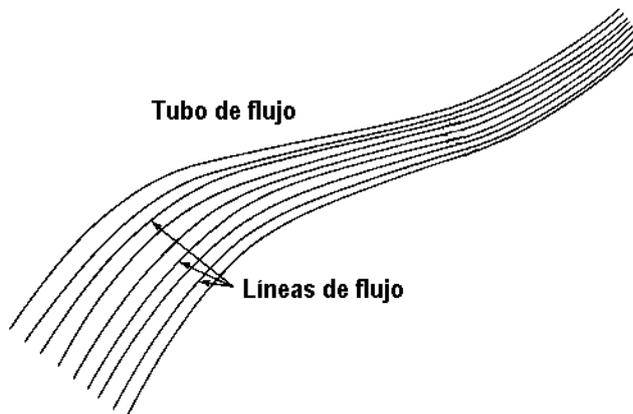
Se dice que el flujo laminar es **estacionario**, si cada pequeña región de fluido que pasa por un determinado punto lo hace con la misma velocidad que todas las partículas que pasaron antes por ese mismo punto. A un determinado punto del espacio ocupado por el fluido le corresponde la misma velocidad en todo instante. Así, *las trayectorias que siguen las partículas no cambian con el tiempo*. Estas trayectorias regulares se denominan **líneas de flujo o de corriente** y no se cruzan nunca, porque de lo contrario en el punto de intersección de una trayectoria con otra se producirían remolinos y el flujo se convierte en turbulento.





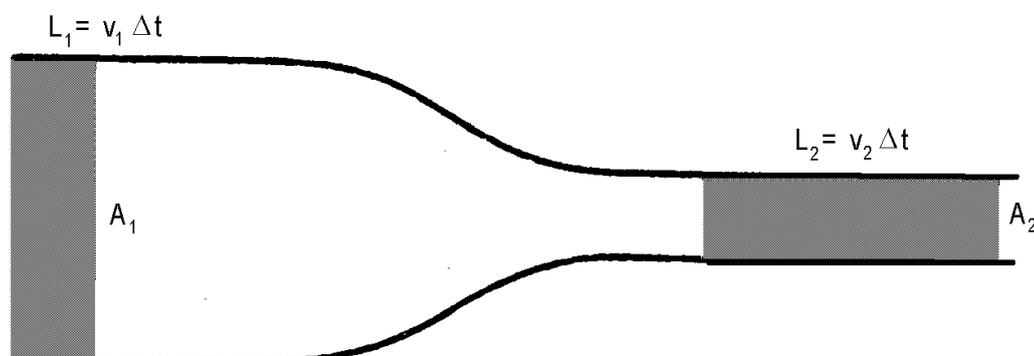
En nuestro estudio no analizaremos la trayectoria de cada partícula de fluido. Enfocaremos nuestra atención en lo que ocurre en cada punto del espacio en un momento determinado; por ejemplo, dando la presión y la velocidad del fluido en ese punto para ese instante.

El movimiento laminar se suele representar con líneas, llamadas líneas de corriente. Cada una de estas líneas de corriente representa la trayectoria de un conjunto de partículas de fluido que salen de un mismo lugar en distintos instantes. En los ensayos de laboratorio se pueden fotografiar dejando fluir gotas de tinta o chorros de humo. En las regiones donde estas líneas de flujo están más próximas indica que la velocidad es mayor.



2.2. Caudal. Ecuación de continuidad

Los líquidos son prácticamente incompresibles, cualesquiera sean las presiones a que sean sometidos su volumen no varía o varía muy poco; aún así nosotros vamos a operar con un modelo de líquido que consideraremos totalmente incompresible esto da lugar a una relación cuantitativa que es la **ecuación de continuidad**. Consideremos el caso de una tubería como la que se indica en la figura y por la que ingresa un volumen V en un tiempo Δt pero como el líquido es un fluido incompresible y la tubería no tiene pérdidas laterales el mismo volumen debe salir por el otro extremo de la tubería en el intervalo de tiempo considerado.



Cuando por la Sección A_1 pasa la totalidad del volumen recorre un espacio $L_1 = v_1 \Delta t$, en cambio, en el otro extremo de la tubería al mismo tiempo tiene que salir el mismo

Física IV

volumen V pero debe recorrer una distancia $L_2 = v_2 \Delta t$. El tiempo es el mismo pero las velocidades son diferentes. Al volumen de líquido en movimiento que ingresa y que es igual al que sale lo podemos escribir como

$$V = L_1 A_1 = L_2 A_2 = v_1 \Delta t A_1 = v_2 \Delta t A_2$$

De donde, simplificando queda

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

O sea que, por tratarse de un fluido incompresible, el producto del módulo de la velocidad del fluido por la sección de la tubería es constante.

Esta nueva magnitud que se asocia al volumen de líquido que en un intervalo de tiempo pasa por la sección de un tubo se denomina **caudal (Q)**, sus unidades son:

$$[Q] = \text{m}^3/\text{s}$$

Si se trata de un flujo estacionario, esto es, que su valor no cambia en el tiempo, las velocidades v_1 y v_2 permanecen constantes entonces se puede escribir Q como

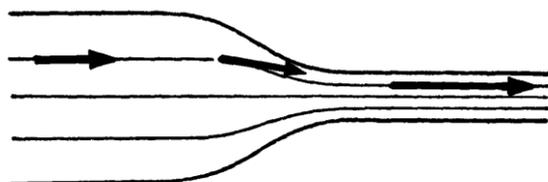
$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 = (L_1 / \Delta t) A_1 = (L_2 / \Delta t) A_2$$

Pero como $V = (L_1 A_1) = (L_2 A_2)$, reordenando resulta

$$Q = (L_1 A_1) / \Delta t = (L_2 A_2) / \Delta t = V / \Delta t$$

Así se puede observar que el caudal, es el volumen de líquido que pasa por una sección por unidad de tiempo. Aunque esta ecuación de continuidad se desarrolló recurriendo al ejemplo de una tubería lo mismo se puede ejemplificar con un tubo de flujo.

Notemos que en las partes más angostas del tubo (donde la velocidad es mayor), las líneas de corriente están más próximas entre sí; por el contrario, en las partes más anchas (donde la velocidad es menor), las líneas de corriente están más separadas. En consecuencia, el mapa de líneas de corriente nos da mucha información sobre la dirección y el sentido de la velocidad del fluido en cada punto; y también nos da una idea cualitativa del módulo de la velocidad, según la densidad de las líneas de corriente de la zona.

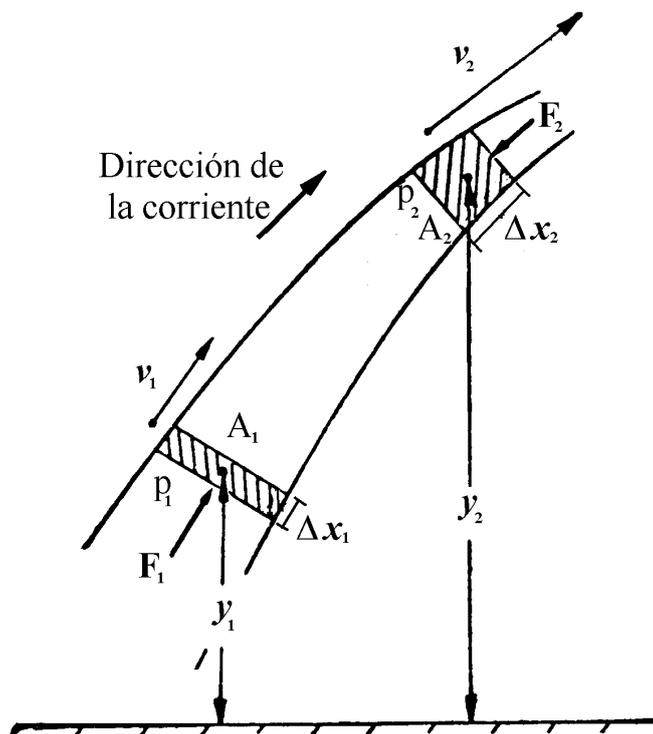




2.3. Teorema de Bernoulli

Limitaremos el estudio de los fluidos en movimiento a ciertas condiciones ideales, nuestro modelo supone que los fluidos son incompresibles, no viscosos (ver pág. 13) y que el movimiento es laminar. La primera condición por un lado garantiza que la densidad sea constante en todo momento y por el otro que si se va a aplicar a gases (que son altamente compresibles) la presión no debe variar a lo largo del proceso para que no varíe la densidad del gas. La segunda y tercera condición de fluido no viscoso y movimiento laminar elimina la posibilidad de pérdidas de energía por rozamiento y permite aplicar el principio de conservación de la energía.

Este teorema fue desarrollado por el físico y matemático suizo Daniel Bernoulli, quien en 1738 encontró la relación fundamental entre la presión, la altura y la velocidad de un fluido ideal. Este teorema demuestra que estas variables no pueden modificarse independientemente una de la otra, sino que están determinadas por la energía del sistema. Las conclusiones de este teorema se pueden aplicar para analizar fenómenos tan distintos como el vuelo de un avión, la circulación del humo por una chimenea, el escurrimiento de agua por los canales o la distribución domiciliar de agua por las cañerías, etc.



Imaginemos que el fluido ideal circula por un tubo de flujo como el que muestra la figura. Consideremos una pequeña porción de fluido de volumen V que ingresa por la sección A_1 ; al cabo de cierto intervalo de tiempo Δt , el fluido ocupará una nueva posición saliendo por la sección A_2 dentro del tubo. Este movimiento se debe a que las capas

Física IV

inferiores de líquido del tubo de flujo ejercen una fuerza F_1 sobre el volumen V , fuerza que, en términos de la presión p_1 , puede expresarse como $p_1.A_1$, y está aplicada en el sentido de la dirección de la corriente.

Análogamente, en A_2 , las capas de fluido superiores a este volumen considerado, empujan ejerciendo una fuerza F_2 en sentido contrario al movimiento, que puede expresarse como $p_2.A_2$.

El trabajo W de las fuerzas F_1 y F_2 que actúan sobre el volumen V resulta:

$$W = F_1 \Delta x_1 - F_2 \Delta x_2 = p_1.A_1. \Delta x_1 - p_2.A_2. \Delta x_2$$

Como el fluido es incompresible, el volumen que pasa por el punto 1 en un intervalo Δt es el mismo que pasa por el punto 2 en el mismo intervalo de tiempo (conservación de caudal). Por lo tanto:

$$V = A_1. \Delta x_1 = A_2. \Delta x_2 \text{ entonces: } W = p_1. V - p_2. V$$

Además, el flujo de este sistema es laminar y el fluido es no viscoso, por lo tanto, no hay trabajo de fuerzas de roce ($W_{F \text{ roce}} = 0$) y se puede aplicar el teorema del trabajo y la energía.

$$W_{FNC} = \Delta E_{\text{mecánica}}$$

$$W_{F1} + W_{F2} = \Delta E_{\text{cinética}} + \Delta E_{\text{potencial}} = \Delta E_{\text{mecánica}}$$

La variación de la energía cinética es;

$$\Delta E_{\text{cinética}} = \left(\frac{1}{2} m_2 v_2^2\right) - \left(\frac{1}{2} m_1 v_1^2\right)$$

Pero $m_1 = m_2 = V\delta$, por lo que la ecuación anterior se puede escribir

$$\Delta E_{\text{cinética}} = \left(\frac{1}{2} V \delta v_2^2\right) - \left(\frac{1}{2} V \delta v_1^2\right)$$

Por otra parte la variación de energía potencial gravitatoria es igual a:

$$\Delta E_{\text{potencial}} = m_2 g y_2 - m_1 g y_1$$

Igual que en el caso anterior $m_1 = m_2 = V\delta$ por lo que la ecuación queda

$$\Delta E_{\text{potencial}} = V \delta g y_2 - V \delta g y_1$$

Si reemplazamos todos los valores obtenidos en la ecuación de trabajo y energía queda:

$$p_1. V - p_2. V = \left(\frac{1}{2} V \delta v_2^2\right) - \left(\frac{1}{2} V \delta v_1^2\right) + V \delta g y_2 - V \delta g y_1$$



Simplificando el volumen V que se encuentra en todos los términos y reagrupando los términos, se tiene;

$$\frac{1}{2} \delta v_1^2 + \delta g y_1 + p_1 = \frac{1}{2} \delta v_2^2 + \delta g y_2 + p_2$$

Pero como los puntos 1 y 2 son puntos arbitrarios dentro del tubo de flujo esta ecuación que relaciona la presión, la velocidad y la altura de un fluido vale para todos los puntos del sistema en consecuencia;

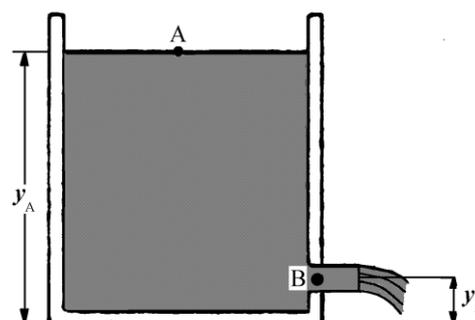
$$p + \frac{1}{2} \delta v^2 + \delta g y = \text{constante}$$

Veremos un conjunto de situaciones que pueden explicarse gracias a este teorema.

2.4. Aplicaciones del teorema de Bernoulli

2.4.1. El teorema de Torricelli

Mediante la aplicación del teorema de Bernoulli calcularemos la velocidad de salida del líquido de un recipiente. Consideremos un depósito de dimensiones mucho mayores que la del diámetro del orificio de salida del líquido como el que se indica en la figura. Vamos a plantear la ecuación de Bernoulli en dos puntos extremos del sistema, el punto A en el borde superior del líquido y el punto B en el orificio de salida del recipiente. La ecuación de Bernoulli para este caso es:



$$\frac{1}{2} \delta v_A^2 + \delta g y_A + p_A = \frac{1}{2} \delta v_B^2 + \delta g y_B + p_B$$

Con la ecuación así planteada para resolverla debemos reemplazar por los valores que corresponden al problema. Los valores de las variables para el punto A son $p_A = p_0$, ya que la superficie del líquido está sometida a la acción de la presión atmosférica, la altura es un dato del problema y_A . La velocidad v_A requiere una consideración especial. Si las dimensiones del recipiente son grandes respecto de las del orificio de salida, la velocidad con que baja el nivel del líquido en el depósito es muy lenta, por tal motivo vamos a considerarla, en este tipo de problemas, $v_A \cong 0$.

Los valores correspondientes al punto B son p_B , que, igual que en el caso anterior es la presión atmosférica, la altura y_B que es dato del problema y la velocidad v_B que es nuestra incógnita. Finalmente reemplazando y resolviendo queda:

$$\delta g y_A + p_0 = \frac{1}{2} \delta v_B^2 + \delta g y_B + p_0 \quad \Rightarrow \quad v_B = \sqrt{2g(y_A - y_B)}$$

Este resultado que se puede deducir de la ecuación de Bernoulli, se conoce como el teorema de Torricelli, quien lo enunció casi un siglo antes de que Bernoulli realizara sus estudios hidrodinámicos. Obsérvese que la expresión matemática es análoga a la de un sólido en caída libre. Esto es así porque en el desarrollo del teorema de Bernoulli se recurrió al teorema de conservación de la energía mecánica.

Física IV

2.4.2. Sifón

Este es un dispositivo para trasvasar líquidos de un recipiente a otro, y consiste en un tubo en U invertido que conecta ambos recipientes. El extremo de salida de líquido debe estar a menor altura que el de ingreso, tal como se ve en la figura. Si aplicamos el Teorema de Bernoulli a los puntos A y C tenemos;

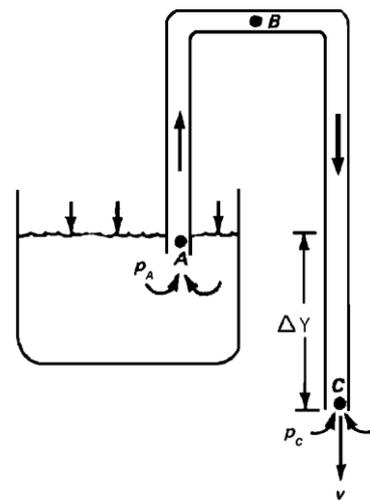
$$\frac{1}{2} \delta v_A^2 + \delta g y_1 + p_A = \frac{1}{2} \delta v_C^2 + \delta g y_2 + p_C$$

Pero, $p_A = p_C = p_o$ por lo que los términos que los contiene se simplifican, por otra parte, igual que en el caso del Teorema de Torricelli, a la velocidad v_A la consideramos igual a cero por ser la sección del recipiente mucho mayor que la del tubo, ($v_A \cong 0$). Reemplazando tenemos;

$$\delta g y_1 = \frac{1}{2} \delta v_C^2 + \delta g y_2$$

despejando resulta

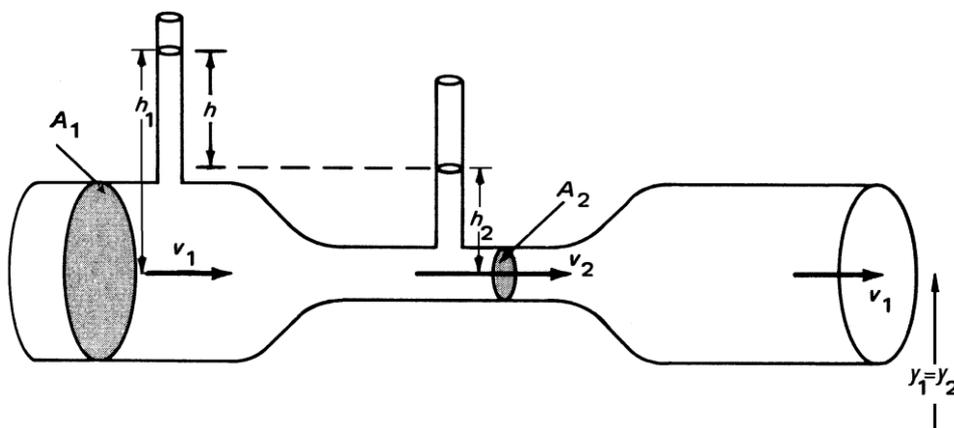
$$v_C = \sqrt{2g(\Delta y)}$$



como puede verse, la expresión anterior es análoga a la del Teorema de Torricelli.

2.4.3. Contador de Venturi

Es otra aplicación del Teorema de Bernoulli, y consiste en un dispositivo que permite medir el caudal y, como derivación, la velocidad, de un líquido que fluye en una tubería. El mecanismo consiste en un estrechamiento de la tubería por donde circula el líquido diseñado de forma que la disminución de la sección sea gradual para asegurar el mantenimiento del régimen laminar y se evite que el sistema entre en régimen turbulento y en consecuencia se pierda energía. Se incorporan dos tubos laterales para medir la presión del fluido en cada una de las secciones. La aplicación del teorema de Bernoulli, a un tubo de flujo que pase por el eje de la sección A_1 y de la sección A_2 , da:





$$p_1 + \frac{1}{2} \delta v_1^2 + \delta g y_1 = p_2 + \frac{1}{2} \delta v_2^2 + \delta g y_2$$

Igual que en la aplicación anterior del teorema debemos reemplazar los términos de la ecuación por los valores que disponemos. Como en nuestro caso la tubería tiene un eje horizontal los valores de y_1 y y_2 son iguales y se pueden simplificar. Las presiones p_1 y p_2 resultan;

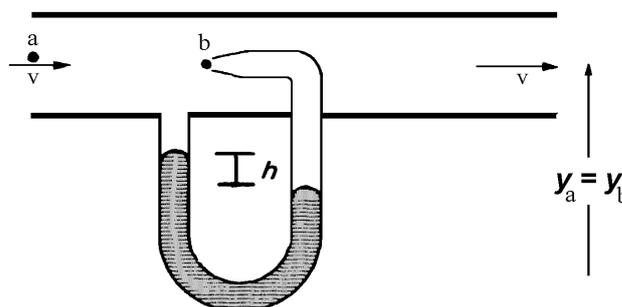
$$p_1 = p_0 + \delta g h_1$$

$$p_2 = p_0 + \delta g h_2$$

Recordando, además, que el caudal es: $Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$, y trabajando algebraicamente sobre la ecuación de Bernoulli; si puede medirse la diferencia de alturas $h_1 - h_2$, y se conocen las áreas A_1 A_2 , es posible calcular el caudal; y como consecuencia, también v_1 y v_2 .

2.4.4. Tubo de Pitot

Es un instrumento destinado a medir la velocidad de los gases que circulan por una tubería. Consiste en un tubo manométrico que se conecta, como indica la figura, a la tubería por la que circula el gas. La presión en la rama izquierda del manómetro, cuya abertura es paralela a la dirección del movimiento del gas, es igual a la presión de la corriente gaseosa. La presión en la rama derecha, cuya abertura es perpendicular a la corriente, puede calcularse aplicando el teorema de Bernoulli a los puntos a y b.



$$p_a + \frac{1}{2} \delta v_a^2 + \delta g y_a = p_b + \frac{1}{2} \delta v_b^2 + \delta g y_b$$

Hay que tener en cuenta que para este problema de circulación de gas la densidad δ es la del gas por otra parte, como, igual que en el caso anterior, los puntos a y b se encuentran a la misma altura $y_a = y_b$ los términos que los contienen son iguales y se pueden simplificar.

La velocidad v_a es la velocidad v de circulación del gas que debemos medir, y como el ingreso al tubo manométrico en el punto b está limitado por el líquido manométrico, la velocidad v_b es cero, reemplazando queda;

$$p_a + \frac{1}{2} \delta v^2 = p_b$$

Si δ_0 es la densidad del líquido del manómetro, y h es la diferencia de alturas del líquido entre sus ramas, se tiene:

$$p_b = p_a + \delta_0 g h$$

Reemplazando en la ecuación anterior, resulta:

$$\delta_0 g h = \frac{1}{2} \delta v^2$$

A partir de la cuál puede deducirse v en función de las magnitudes medibles.

Es de destacar que en este caso se puede aplicar el Teorema de Bernoulli a gases, que notoriamente no cumplen con la condición de incompresibilidad exigida en el desarrollo del teorema porque en esta situación nos aseguramos que el gas no esté sometido a presiones diferentes, o lo que es lo mismo, a cambios de volumen, entre el punto a y el punto b.

Si bien el modelo de tubo de Pitot mostrado es para operar en una tubería existen otros modelos que, recurriendo al mismo principio de diseño, sirven para medir la velocidad de los gases en ámbitos abiertos, en particular se los emplea para medir la velocidad del viento.

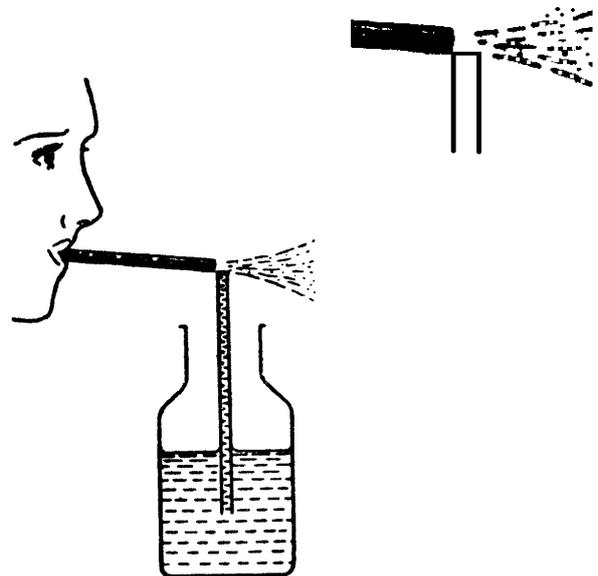
2.4.5. El aerógrafo

El aerógrafo es un dispositivo muy simple para pintar superficies no muy extensas. Consiste en dos tubos de uno a dos milímetros de diámetro interior conectados en ángulo recto, cuando se sopla por uno de ellos el aire que sale a velocidad alta origina una depresión en los alrededores, si el otro tubo se encuentra con un extremo sumergido en pintura esta es elevada por la diferencia de presión originada y el mismo aire la impulsa formando pequeñas gotitas.

Este dispositivo es el mismo que se emplea en las pistolas para pintar, aunque estas recurren al aire comprimido para producir la corriente de aire.

Este procedimiento de aspiración ha sido muy empleado en gran número de dispositivos, como el carburador de los automóviles, bombas de vacío, pulverizadores de insecticida, etc.

No todos los pulverizadores de líquidos funcionan por aplicación de este principio, los extinguidores de incendio, los “sifones” de





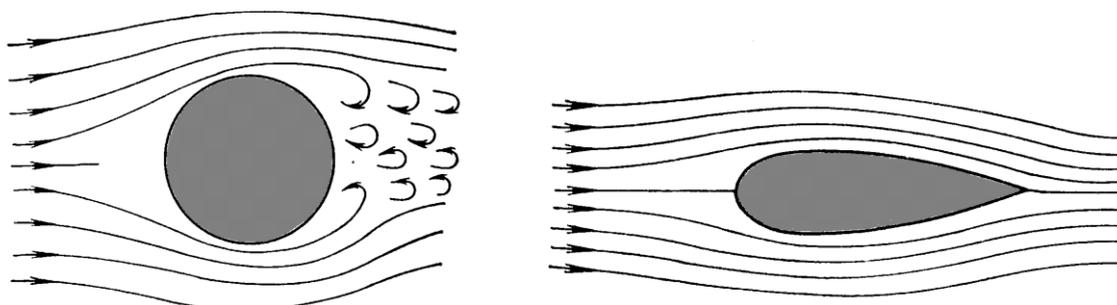
soda, y los pulverizadores habitualmente llamados “en aerosol” expulsan el líquido contenido en su interior por una diferencia de presión originada por la existencia de algún gas comprimido en su interior. Por otra parte, muchos perfumeros y pulverizadores de limpiadores y detergentes poseen una pequeña bomba manual por las que se inyecta aire a presión cada vez que se los necesita.

2.5. Movimiento de un sólido en un fluido viscoso

Cuando corremos no es lo mismo tener el viento a favor que correr en dirección contraria al viento. El aire no es más que un fluido y no de los más viscosos si lo comparamos con algunos aceites o la glicerina, sin embargo, sentimos su efecto favorable o desfavorable, esto ocurre para todos los cuerpos que se mueven en un fluido, se ven afectados por la fricción que impone la viscosidad del medio.

Por este motivo, cuando un cuerpo se mueve en un medio viscoso, existe una fuerza adicional para vencer el efecto que imponen las fuerzas de fricción del medio. Pero esta fuerza adicional a lo largo del recorrido que hace el cuerpo, es un trabajo. Es energía que se pierde por rozamiento en forma de calor. Es importante entonces diseñar a los cuerpos para que su perfil ofrezca la menor resistencia al medio viscoso. Cuando se deja caer una gota de agua, adopta la forma que requiere mínima energía, ese es justamente el **perfil aerodinámico** buscado.

Si cuando el cuerpo avanza aparta el fluido de una manera suave y sin que se produzcan turbulencias y deja que se vuelva a juntar tras su paso aún más gradualmente, de manera que la turbulencia resulte mínima, entonces la energía disipada también es mínima.



Básicamente, el **perfil aerodinámico** consiste en un frente curvo y una cola que se afina gradualmente, que recuerda a una gota y reduce el rozamiento viscoso. En el caso de muchos animales como lo peces o los pingüinos el perfil aerodinámico es el resultado de un proceso de evolución natural que demoró muchos años, en el mundo artificial lograr diseños óptimos también ha llevado mucho tiempo y es un proceso no terminado. Si se observa el perfil de los automóviles fabricados durante el siglo XX se puede ver como la evolución de los diseños ha llevado a los perfiles que reducen cada vez más las pérdidas por rozamiento.

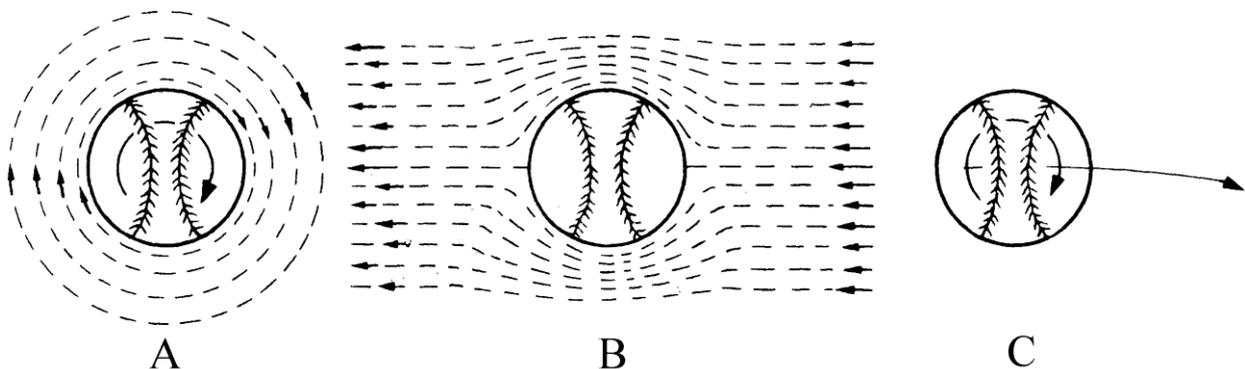
La fuerza de rozamiento viscoso es: para bajas velocidades y flujo laminar, proporcional a la velocidad del móvil ($F = k.v$); pero a partir de determinada velocidad ya no es

posible mantener el régimen laminar, aparece el régimen turbulento y la fuerza de rozamiento viscoso es función del cuadrado de la velocidad ($F = k \cdot v^2$). Es por este motivo, entre otras razones, es que se incrementa de manera no lineal el consumo de combustible en los automóviles al aumentar la velocidad.

2.6.1. El Gol Olímpico

En el curso de mecánica se analizó la trayectoria de un proyectil lanzado con un ángulo arbitrario, de ese análisis se concluyó que la trayectoria del proyectil es una parábola contenida en un plano vertical. Pero todos vimos por televisión algún partido de fútbol en el que el gol se producía porque la pelota había seguido una trayectoria alabeada. Entonces, ¿en qué quedamos?, ¿en el curso de Física los proyectiles siguen trayectorias planas y en la realidad hacen otra cosa? La explicación tiene que ver con el modelo empleado para resolver el problema del proyectil en mecánica, este modelo despreció el rozamiento del proyectil con el aire; pero cuando se considera el efecto de rozamiento del proyectil con las capas de aire circundante la resolución matemática del problema se vuelve mucho más compleja. A través del Teorema de Bernoulli, estamos en condiciones de dar una explicación cualitativa de este fenómeno.

Recordemos que para lograr el efecto de trayectoria alabeada es necesario patear la pelota con “efecto”, esto es logrando que salga con dos movimientos, uno de translación y otro de rotación sobre su eje. Vamos a analizar primero el efecto de cada uno de estos movimientos por separado y luego, en un tercer momento, el efecto combinado de



ambos.

A: La pelota rota sobre sí misma y arrastra consigo una fina capa de aire por efecto del rozamiento.

B: La figura representa una pelota quieta en una corriente de aire que se mueve de derecha a izquierda. El movimiento de la corriente de aire al pasar alrededor de la pelota es el mismo que si esta estuviera moviéndose en el aire en calma, de izquierda a derecha.

C: En el efecto combinado, si la pelota, a la vez que avanza en el sentido del lanzamiento, gira sobre sí misma, se superponen los mapas de las situaciones A y B. El mapa de líneas de corrientes resulta de

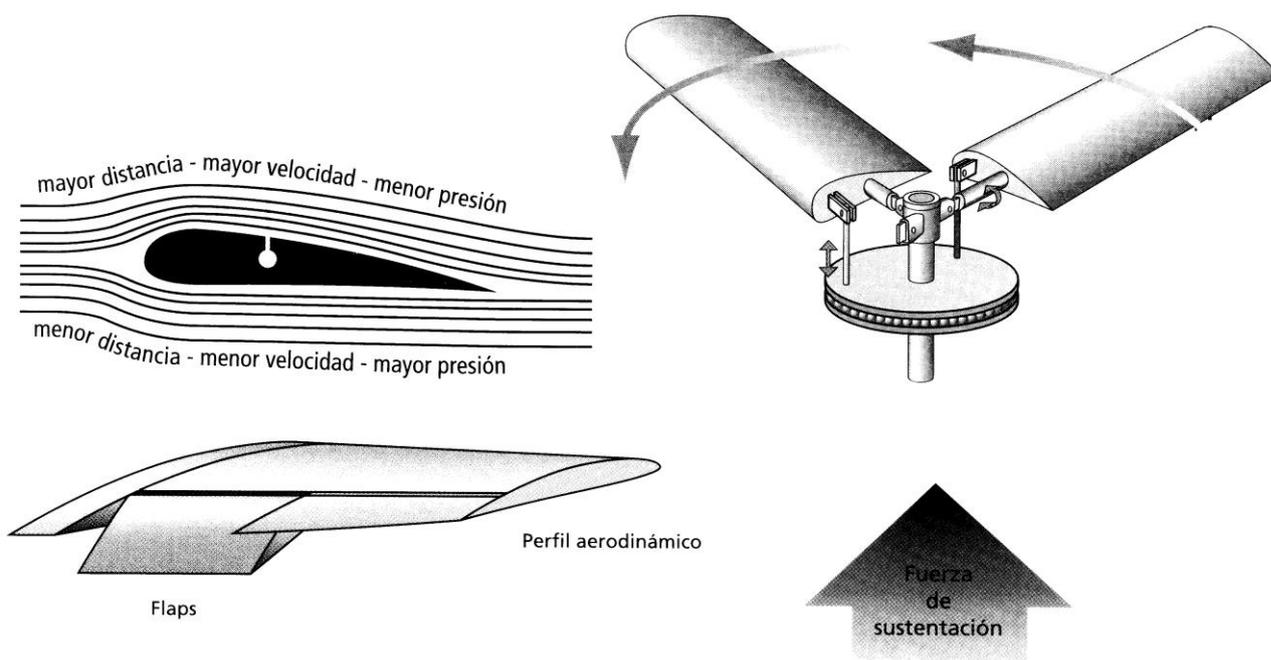


sumar en cada punto los vectores V_A y V_B . En consecuencia, a un lado de la pelota, los módulos de las velocidades se suman y, al otro, se restan. La velocidad del aire respecto de la pelota es mayor de un lado que del otro, pero por Bernoulli si las velocidades son diferentes las presiones también deben serlo, para mantener la igualdad de los términos (no se considera el efecto de altura ya que ambos lados de la pelota están al mismo nivel) En consecuencia en la zona donde los vectores velocidad se restan la presión es mayor y esta diferencia de presión desvía a la pelota del movimiento plano que tendría si no hubiera rozamiento con el aire. Este suceso a veces se trata de aumentar intencionalmente así las pelotas de tenis tienen una cobertura irregular para aumentar el efecto de arrastre del aire circundante.

2.6.2. El vuelo de los aviones

Los aviones pueden volar porque el diseño de sus alas es tal que tienen una mayor curvatura en la superficie superior que en la inferior. Cuando el ala avanza las partículas de aire que pasan sobre la cara superior deben realizar un recorrido mayor que las que pasan frente a la cara inferior, casi sin deformación, por lo que la velocidad de las partículas de arriba es mayor que las de abajo. De acuerdo con la ecuación de Bernoulli, despreciando la diferencia de alturas entre las dos caras del ala del avión, si la velocidad del aire sobre la cara superior es mayor que la que existe sobre la cara inferior la presión sobre la cara superior debe ser menor que la que hay sobre la cara inferior.

Esta diferencia de presiones entre la cara inferior y la superior multiplicada por la superficie del ala determina el valor de la *fuerza de sustentación*, que es la que sostiene el avión en el aire.



2.7. Viscosidad

Todos hemos tenido la experiencia de trasvasar líquidos, en algunos casos eso se hace con facilidad y rapidez, cuando el líquido es un refresco o agua, en otros puede ser bastante más lento, como cuando el líquido es miel o algunos aceites industriales.

Cuando se opera con líquidos reales aún en el movimiento laminar, las distintas capas no se mueven juntas, tiene pequeñas o grandes diferencias de movimiento unas sobre las otras, esto origina una fricción interna, el fenómeno se repite entre las sucesivas capas que se van poniendo en movimiento, y esto determina la manera en que se mueve el fluido. El efecto de conjunto de esta fricción interna se llama **viscosidad**.

Desde el punto de vista microscópico la viscosidad en los fluidos se origina en la fuerza de cohesión de las moléculas del fluido entre sí y en la de los sólidos que están en contacto con él y en general, disminuye con la temperatura. Ejemplo de fluidos que disminuyen fuertemente su viscosidad con la temperatura son el alquitrán y la parafina que a temperatura ambiente parecen sólidos, pero en cuanto se eleva la temperatura en unos pocos grados se vuelven bastante fluidos.

Todos los fluidos son viscosos, algunos se caracterizan por su alta viscosidad, como el almíbar, el alquitrán o la miel, otros por su muy baja viscosidad como los gases. La viscosidad de un líquido se mide en función de la rapidez con que se sumerge un sólido en él, o bien por la velocidad con que sale de un orificio.

La viscosidad de los fluidos es de gran importancia práctica ya que estos rozamientos originan una gran pérdida de energía que afecta el movimiento del líquido.

2.8. Hemodinámica

La sangre circula por todo el cuerpo a través de un complejo sistema de conductos o vasos (arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas) impulsada por el corazón, que funciona como dos bombas.

El corazón late constantemente a razón de 60 a 80 veces por minuto (**frecuencia cardiaca**). En cada latido el ventrículo izquierdo impulsa unos 80 cm^3 de sangre al **circuito sistémico** y otro tanto hace el ventrículo derecho al **circuito pulmonar**. De manera que, aproximadamente en un minuto, el corazón bombea los 5 litros de sangre que tenemos en el organismo, completando todo el circuito. El caudal sanguíneo es de $5,4 \text{ l / min.}$ en condiciones normales y de reposo.

El circuito sistémico comienza en el corazón, sigue por la aorta que se ramifica en diversas arterias; éstas se dividen en arteriolas, que se vuelven a subdividir en finísimos capilares para llegar a todos los tejidos. Aunque el área de las arterias es menor que el de la aorta, la suma de las áreas de las arterias es mayor que el área de la aorta. En consecuencia, de acuerdo con la ecuación de continuidad, la velocidad de la sangre en las arterias es menor que en la aorta. Para cuando la sangre llega a los capilares, el



área total transversal del árbol circulatorio es tan grande que la velocidad es lo suficientemente pequeña como para permitir la cómoda difusión de gases (O_2 y CO_2).

Cuestiones:

1. Cuando un chorro de agua sale de la canilla en flujo laminar, este se estrecha cada vez más a medida que se aleja del pico de la canilla. Hasta que finalmente se rompe. Explica porque ocurre este estrechamiento de la vena líquida.
2. Aviones de motor a pistón siempre trataban de despegar en contra del viento. ¿puedes explicar por qué?
3. Coloca una hoja de papel horizontal apoyada sobre tu labio inferior y sopla. Observa que ocurre con la hoja y explica por qué.
4. Un ingeniero hidráulico se encuentra en una emergencia y debe medir la velocidad del agua que fluye por un canal abierto, para ello decide hacer un instrumento de medida con una pajita de refresco que se puede doblar en forma de L. Coloca la parte horizontal de la L enfrentada a la corriente y mide cuánto sube el agua respecto del nivel de corriente en la columna vertical. ¿cómo podría con elementos tan sencillos medir la velocidad del agua en el canal?
5. Los planeadores son aviones que funcionan sin motor y pueden recorrer grandes distancias. Explica cómo funcionan.

Problemas:

1) ¿Cuánto tarda en llenarse un depósito cilíndrico de altura 3 m y diámetro 2 m, si el líquido fluye desde un tubo de 5 cm de diámetro con velocidad de 2 m / s?

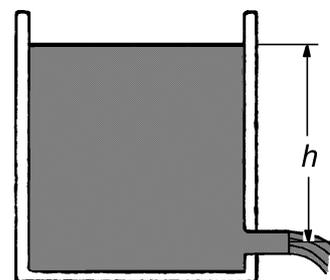
R: $t = 40$ minutos

2) Con una manguera, se llena un recipiente de 100 litros de capacidad, en 30 s, determina la velocidad con la que fluye el líquido, si la sección de la manguera es de 12 cm^2 .

R: $v = 2.75$ m/s

3) En un depósito grande de agua se abre un orificio a 80 cm del nivel superior del líquido. Determina:

- a- la velocidad con la que sale el agua del recipiente.
- b- Si el nivel superior del agua se encuentra a 1 m del piso determine la distancia horizontal a que cae el agua, con respecto a la pared del recipiente.
- c- ¿por qué al realizar la experiencia, la distancia resulta menor que la predicha en el punto b?



R: a) $v = 3.96$ m/s b) $x = 0.8$ m

4) El diámetro de la aorta es aproximadamente de 1 cm y la sangre fluye por ella con una rapidez de 30 cm / s. Determina la velocidad de la sangre en los finos capilares, si en total tienen una sección transversal de 2000 cm^2 .

R: $v = 0.012$ cm/s

Física IV

5) El agua contenida en un tanque elevado fluye por una tubería que tiene una válvula, a 12 m por debajo del nivel del agua. Determina:

- a- la presión del agua en la válvula cuando está cerrada.
- b- la presión en la válvula cuando está abierta y el agua fluye con una velocidad de 10 m /s, y continúa por la cañería.

R: a) 218900 Pa b) 168900 Pa

6) Un recipiente contiene agua hasta una altura de 50 cm. A una altura de 10 cm del fondo del recipiente, se hace un agujero de 0,5 cm de diámetro. Determina:

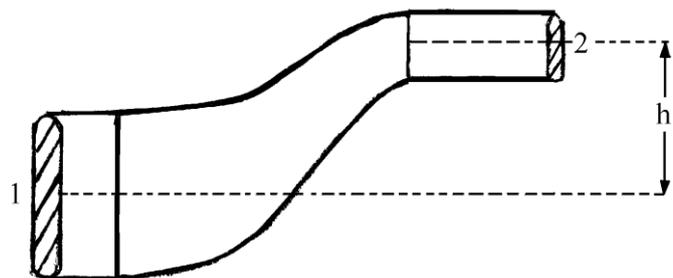
- a- la velocidad con que sale el agua del agujero.
- b- la cantidad del agua que sale en 5 s (el recipiente es suficientemente ancho como para suponer que el nivel de agua no varía).

R: a) $v = 2.8 \text{ m/s}$ b) $V = 2.75 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

7) Una casa se abastece de agua por medio de una tubería de 5 cm de diámetro. La sobre presión al nivel de la calle es de $3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ y el agua fluye a 0,5 m/s. ¿Cuál será la sobre presión y la velocidad de flujo en la cañería de 2,5 cm de diámetro, en la terraza y a 10 m de altura?

R: a) $v = 2 \text{ m/s}$ b) $p = 200125 \text{ Pa}$

8) Por un tubo como el mostrado en la figura, fluyen 200 litros de agua por segundo. La presión en el extremo 1 es de $2 \times 10^5 \text{ Pa}$. El extremo 2 se encuentra a una altura de 6m con respecto al nivel del extremo 1. El diámetro del tubo en los extremos 1 y 2 es respectivamente 30 cm y 20 cm. Determina:



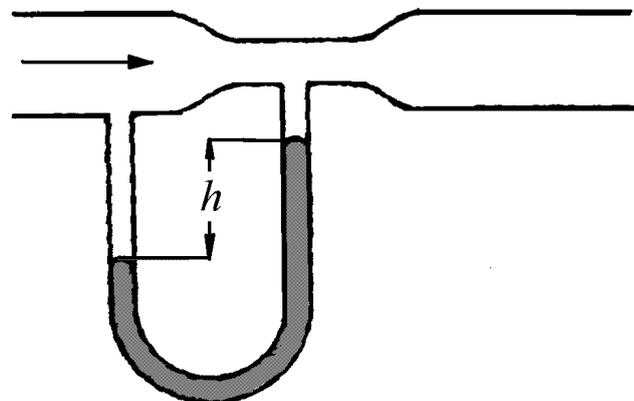
- a- la velocidad en los dos extremos
- b- la presión en el extremo 2

R: a) $v_1 = 2.83 \text{ m/s}$ $v_2 = 6.36 \text{ m/s}$

b) $p = 1.25 \times 10^5 \text{ Pa}$

9) Las áreas de la parte ancha y angosta del tubo de la figura son respectivamente, 50 cm^2 y 10 cm^2 . El caudal de agua es de $2000 \text{ cm}^3 / \text{s}$. Determina:

- a- la velocidad del agua en ambas partes del tubo
- b- la diferencia de presión entre las partes ancha y angosta.
- c- la diferencia de altura en las columnas de mercurio.



R: a) $v_1 = 0.4 \text{ m/s}$ $v_2 = 2 \text{ m/s}$
 b) $p = 1920 \text{ Pa}$
 c) $h = 0.0144 \text{ m}$



10) El nivel de agua de un tanque ubicado en la azotea de una casa está a 4,5 m del piso. El depósito suministra agua por medio de un caño 2 de 1 cm de radio. A continuación, empalma con un caño 3 de 0,5 cm de radio, que tiene una canilla en su extremo, a 0,5 m del piso. La sección de la tubería es muy pequeña en relación con la del depósito. Determina:

- ¿Cuál es la presión en el punto 3 cuando la canilla está cerrada?
- Si se abre la canilla al máximo, ¿cuánto tardará en llenarse de agua una botella de un litro si la canilla tiene la misma sección que el tubo 3?
- ¿Cuál es la velocidad del agua en la tubería 2 con la canilla totalmente abierta?
- ¿Cuál será la presión en el punto 3 cuando la canilla esté abierta?

R: a) $p_3 = 140500 \text{ Pa}$ b) $t = 1.44 \text{ s}$
c) $v_2 = 2.21 \text{ m/s}$ d) $p_3 = p_0 = 101300 \text{ Pa}$

