

## HIDROSTÁTICA

### Introducción

#### Fluidos en equilibrio

La materia existe en diferentes estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso. Los líquidos y los gases tienen propiedades comunes tales como su capacidad de fluir y adoptar la forma de los recipientes que los contiene por lo que se los denomina conjuntamente *fluidos*.

Los líquidos son prácticamente incompresibles, por lo que podemos considerar que su volumen no se modifica. El gas, en cambio, se expande y comprime con facilidad.

La *hidrostatica* estudia el comportamiento de los líquidos en equilibrio, es decir cuando no hay fuerzas que alteren el estado de reposo o de movimiento del líquido. También se emplea, como aproximación, en algunas situaciones de falta de equilibrio en las que los efectos dinámicos son de poca monta.

Aunque los fluidos obedecen a las mismas leyes físicas que los sólidos, la facilidad con la que cambian de forma hace sea conveniente estudiar pequeñas porciones en lugar de todo el fluido [1]. Por eso se reemplazan las *magnitudes extensivas* (que dependen de la cantidad de materia) por las *magnitudes intensivas* (que no dependen de la cantidad de materia): la masa se reemplaza por la *densidad* y el peso se reemplaza por el *peso específico*.

#### Densidad y peso específico

La *densidad* ( $\delta$ ) de un cuerpo es el cociente entre la masa ( $m$ ) del cuerpo y el volumen ( $V$ ) que ocupa:

$$\delta = \frac{m}{V}$$

Como ya dijimos, la densidad es una magnitud intensiva (no depende de la cantidad de materia sino solo del tipo de materia).

Las unidades de medida de la densidad son, por ejemplo, kg/lit. Así, la densidad del agua es aproximadamente de 1 kg/lit y la del hierro 7,8 kg/lit. Sin embargo, pueden utilizarse otras unidades, como por ejemplo kg/dm<sup>3</sup>, g/mm<sup>3</sup> y lb/pie<sup>3</sup>. En el sistema internacional, la densidad se mide en kg/m<sup>3</sup>.

Cuando el cuerpo es homogéneo, la densidad es la misma en diferentes regiones del cuerpo. Si el cuerpo es heterogéneo, la densidad varía para diferentes regiones del cuerpo y se puede establecer una *densidad media*, como el cociente entre la masa del cuerpo y su volumen.

La densidad de los líquidos varía muy poco dentro de muy amplios límites de presión y temperatura. En cambio, la de los gases es muy sensible a las variaciones de presión y temperatura.

De manera análoga, el peso específico ( $\rho$ ) es el cociente entre el peso ( $P$ ) y el volumen ( $V$ ) por unidad de volumen, con las mismas consideraciones anteriores:

$$\rho = \frac{P}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \delta \cdot g$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Unidades posibles para el peso específico son, por ejemplo, kgf/lit, y gf/mm<sup>3</sup>. En el sistema internacional la unidad específico es N/m<sup>3</sup>.

**Hidro.** Aunque *hidro* en griego significa agua, la hidrostatica se ocupa de los líquidos en general.

**$\delta$ .** La letra griega  $\delta$  (delta) es la equivalente a nuestra "d", de la palabra densidad.

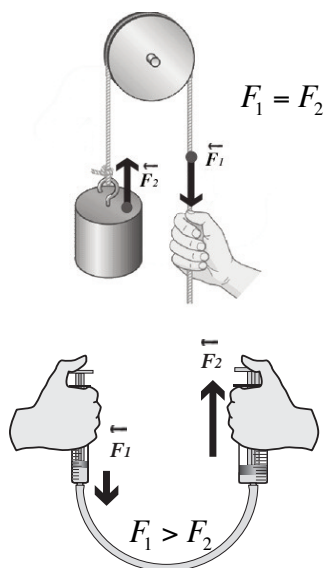
**$\rho$ .** La letra griega  $\rho$  (rho) es la equivalente a nuestra "r", aunque se parece a la "p" de peso.

Material	Peso Especifico (N/m <sup>3</sup> )
Agua (4 °C y p = 1 atm )	9.999,70
Agua de Mar (15 °C y p = 1 atm)	10.250,00
Alcohol	8.000,00
Aceite de Oliva	9.200,00
Aire Frio (0 °C y p = 1 atm)	12,90
Hierro	78.000,00
Madera Dura (Quebracho)	13.000,00
Plomo	114.000,00
Papel	12.000,00
Nafta	7.500,00
Aluminio	27.000,00

**Avoirdupois** es el nombre del sistema anglosajón en el que el peso específico se mide en libras fuerza sobre pie cúbico (lbf/ft<sup>3</sup>). En ese sistema también coexiste la doble denominación de lb (libra masa) y lbf (libra fuerza), como pasa con el kilogramo en el sistema internacional.

[1] Aunque lo suficientemente grande con respecto al tamaño molecular

### Fuerza y presión



Cuando en una situación de equilibrio la fuerza la transmite un sólido, como por ejemplo una soga, el valor de la fuerza no cambia por efecto de la transmisión. Consideremos, por ejemplo un cuerpo que cuelga de una polea y se mantienen en equilibrio utilizando una soga. La soga transmite la fuerza sin cambiar su valor: la intensidad de la fuerza que la mano hace sobre la soga es la misma que la que la soga hace sobre el cuerpo.

Sin embargo, cuando la fuerza la transmite un fluido el valor de la fuerza puede cambiar mucho. Para entenderlo podemos recurrir a dos jeringas (sin aguja) de secciones diferentes y un tubo flexible que las conecta. Si llenamos con agua los depósitos de ambas jeringas y el tubo flexible, al empujar uno de los pistones, veremos que la fuerza que hay que hacer en el otro para conseguir el equilibrio es diferente: en el pistón más grueso hay que hacer mayor fuerza.

El hecho de que los fluidos modifiquen el valor de la fuerza al transmitirla, le resta importancia al concepto de fuerza al tratar con fluidos. ¿Habrà alguna otra magnitud física, en lugar de la fuerza, que no cambie de valor al transmitirse? Sí, es la *presión*.

En el caso de las jeringas:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

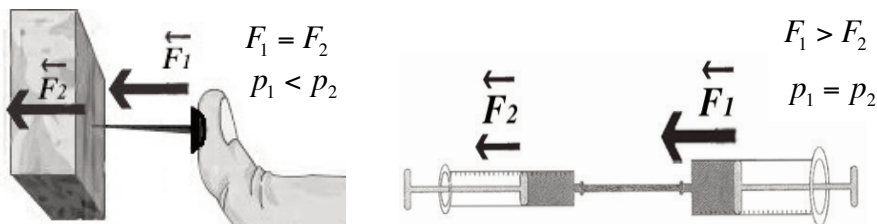
$F_1$  es la fuerza que el pistón angosto hace sobre el fluido y  $A_1$  el área de la sección transversal del pistón angosto.  $F_2$  es la fuerza que el fluido hace sobre el pistón grueso y  $A_2$  el área de la sección transversal del pistón grueso.

Por eso, conviene introducir la magnitud *presión* ( $p$ ) en un fluido como la intensidad de la fuerza que se ejerce, por unidad de área [2]:

$$p = \frac{F}{A}$$

**La presión, una magnitud escalar.** La fuerza aplicada sobre la superficie es un vector. A pesar de eso, la presión que resulta a partir de esa fuerza, es un escalar: no tiene dirección.

Para una fuerza aplicada sobre un sólido en equilibrio no existen restricciones en cuanto a su dirección. En cambio, para un fluido en equilibrio, la fuerza aplicada sobre él (o la que él aplica) siempre es perpendicular a la superficie, ya que si hubiera fuerzas tangenciales obligarían al fluido a ponerse en movimiento, o sea a fluir.



En el equilibrio la fuerza que el dedo hace sobre la chincheta ( $F_1$ ) es de igual valor que la fuerza que la chincheta hace sobre la pared ( $F_2$ ). La presión en la cabeza circular y chata de la chincheta (y en el dedo) es menor que la presión en su afilada punta (y en la pared).

La fuerza que el émbolo grande hace sobre el fluido ( $F_1$ ) es de mayor intensidad que la fuerza que el fluido hace sobre el émbolo pequeño ( $F_2$ ). En el equilibrio la presión en el émbolo grande es igual a la presión en el émbolo pequeño.

En pocas palabras, así como el concepto de **fuerza** es muy útil para los cuerpos **sólidos**, el concepto de **presión** es el más importante para los **fluidos**.

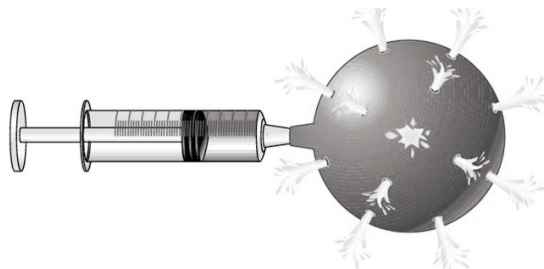
[2] Con más precisión, la presión es el cociente entre el módulo de la fuerza perpendicular a una superficie y el área de esa superficie.

### Principio de Pascal

El hecho de que los fluidos en equilibrio transmiten la presión sin modificar su intensidad fue establecido por el físico y matemático francés Blaise Pascal (1623–1662) y se conoce como **Principio de Pascal**:

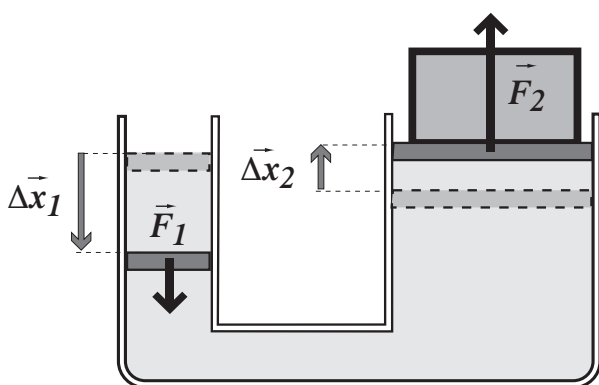
*Los cambios de presión en un fluido incompresible (líquido) en equilibrio dentro de un recipiente de paredes indeformables se transmite sin alteración a todo el fluido.*

**Incompresibilidad de los líquidos.** Aunque usualmente consideramos que los líquidos son incompresibles, la verdad es que un poco se comprimen. Esa pequeña compresión es importante, ya que es lo que permite la propagación del sonido a través del líquido.



Esta experiencia permite comprobar la validez del principio de Pascal. Al oprimir el émbolo de la jeringa, el consecuente cambio de presión se transmite a todo el fluido contenido en la esfera rígida y los chorros de agua salen por los orificios al mismo tiempo. Aquellos que están en el mismo plano horizontal tienen la misma amplitud.

También se evidencia el principio de Pascal en la prensa hidráulica de la figura: al hacer fuerza en un extremo, el cambio de presión correspondiente se transmite a través del líquido y se manifiesta por la acción de una fuerza sobre el objeto que está en el otro extremo. Los ascensores hidráulicos y los frenos hidráulicos también se basan en ese principio.



$$\Delta p_1 = \Delta p_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

donde  $A_1$  y  $A_2$  son las áreas de los émbolos respectivos

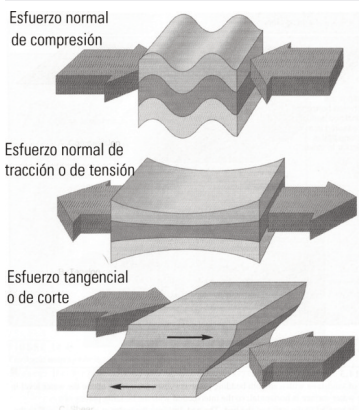
**Prensa hidráulica.** Es un dispositivo "multiplicador de fuerzas" que funciona por el principio de Pascal.

En la prensa hidráulica se aplica una fuerza sobre el émbolo de menor área y se consigue una fuerza mayor sobre el émbolo mayor. La relación entre las fuerzas es la misma que existe entre las áreas. Si bien se logra amplificar la fuerza, no se amplifica la energía (aún despreciando el rozamiento): el trabajo realizado por la fuerza chica sobre el pistón pequeño es igual al que la fuerza mayor hace sobre el pistón grande (despreciando los efectos dinámicos). El volumen de líquido desplazado por el pistón pequeño se distribuye en una capa fina en el pistón grande ( $\Delta V_1 = \Delta V_2$ ) y el producto de la fuerza por el desplazamiento es igual en ambas ramas. Así,

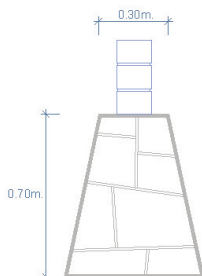
$$\left. \begin{aligned} L_{F_1} &= F_1 \cdot \Delta x_1 = \Delta p_1 \cdot A_1 \cdot \Delta x_1 = \Delta p_1 \cdot \Delta V_1 \\ L_{F_2} &= F_2 \cdot \Delta x_2 = \Delta p_2 \cdot A_2 \cdot \Delta x_2 = \Delta p_2 \cdot \Delta V_2 \end{aligned} \right\} L_{F_1} = L_{F_2}$$

Prohibida la reproducción total o parcial de este material sin el permiso de la cátedra.

**"Presión" en sólidos.** En rigor, para cuerpos sólidos el cociente entre el módulo de la fuerza perpendicular que comprime a una superficie y el área de esa superficie se denomina *esfuerzo normal de compresión*. En un fluido ideal las moléculas sólo pueden comprimirse o empujarse, pero en un sólido también pueden "tirar" (*esfuerzo normal de tracción o tensión*) y "arrastrar" (*esfuerzo tangencial o de corte*).



Un bloque apoyado sobre la mesa también origina una presión, que se calcula como el cociente entre el peso del bloque y el área de la superficie de apoyo. (Ver recuadro de la izquierda)



**Cimientos.** Los edificios se apoyan sobre superficies de dimensiones mayores que las secciones de sus paredes y columnas. El objetivo es que el peso de la construcción se distribuya en un área mayor para evitar que se venza la resistencia mecánica del suelo.

**Taco aguja.** El peso de la mujer se distribuye en una área muy pequeña. En los antiguos aviones cuyo piso estaba hecho de un material blando estaba prohibido usar este tipo de zapatos.

### Unidades de medida de la presión

La presión es quizá una de las magnitudes físicas en las que se emplea más diversidad de unidades para medirla. Una unidad posible es la que resulta de utilizar kgf para la fuerza y cm<sup>2</sup> para el área, de donde resulta el kgf/cm<sup>2</sup>. Esta unidad tiene la ventaja de que la presión atmosférica (la presión asociada a la fuerza que la atmósfera ejerce sobre el suelo y sobre todos los objetos) es muy próxima a 1 en esas unidades:

$$p_{atm} \cong 1 \frac{kgf}{cm^2}$$

El valor de la presión atmosférica permite introducir la unidad *atmósfera* (atm), igual al valor de la presión atmosférica. Así se habla, por ejemplo de una presión de 3 atm, o sea igual a 3 veces la presión atmosférica.

Sin embargo, la unidad recomendada en física es la del sistema internacional, que utiliza newton para la fuerza y m<sup>2</sup> para el área. Resulta así el N/m<sup>2</sup>, que recibe el nombre de *pascal* (Pa):

$$1 Pa = 1 \frac{N}{m^2}$$

El pascal es una unidad de presión muy pequeña comparada con la presión atmosférica, ya que equivale a 1 N (menos que 1 kgf) repartido en un área de 1 m<sup>2</sup> (mucho más grande que 1 cm<sup>2</sup>). Por eso, se suelen usar sus múltiplos, el hectopascal (hPa) = 100 Pa y el kilopascal (kPa) = 1000 Pa.

Para tener una idea del valor de la presión atmosférica en pascales:

$$p_{atm} \cong 1 \frac{kgf}{cm^2} \cong \frac{10N}{10^{-4}m^2} = 10^5 \frac{N}{m^2} = 100.000 Pa = 1000 hPa$$

En las estaciones de servicio, todavía es habitual usar unidades de origen anglosajón para medir la presión del aire de los neumáticos. Estas unidades emplean la *libra fuerza* (lbf) para la fuerza y la *pulgada cuadrada* (plg<sup>2</sup>) para el área, de donde resultan lbf/plg<sup>2</sup>. Esta unidad también se conoce como *psi*:

$$1 psi = 1 \frac{lbf}{plg^2} \quad (\text{ver ejemplo de la página 7})$$

**Presión atmosférica normal.** La presión atmosférica varía con la altura y las condiciones meteorológicas. La presión atmosférica normal corresponde a la presión típica, ni alta ni baja, a nivel del mar y se ha estandarizado internacionalmente al valor de 101.325 Pa.

**psi.** Viene de las iniciales de *pounds per square inch*, que significa libras por pulgada cuadrada, en inglés.

En medicina, es habitual dar la presión de la sangre en milímetros y centímetros de mercurio (mmHg y cmHg) ya que, como veremos en lo que sigue, la altura de una columna de líquido sirve para establecer una medida de la presión.

**Principio fundamental de la hidrostática**

El tipo de enlace que hay entre las moléculas de un líquido hace que sólo pueda ejercer fuerzas perpendiculares de compresión sobre las paredes del recipiente y sobre la superficie de los objetos sumergidos, sin importar la orientación que adopten esas superficies fronteras del líquido. La presión se interpreta como la magnitud de la fuerza normal ejercida por unidad de superficie y puede valer distinto en los diferentes puntos del sistema.

Al sumergirnos en agua podemos sentir que la presión aumenta con la profundidad. Nuestros oídos detectan este cambio de presión, pues percibimos que el líquido ejerce una fuerza normal de compresión mayor sobre la membrana del tímpano cuanto más hondo estamos. La sensación experimentada en una determinada profundidad es la misma, sin que importe la orientación de la cabeza; *la presión es una magnitud escalar: no tiene asociada una dirección y un sentido*. En cada punto existe un determinado valor de presión que está en relación con la intensidad de la fuerza que el líquido ejerce perpendicularmente al tímpano, esté la cabeza erguida o acostada.

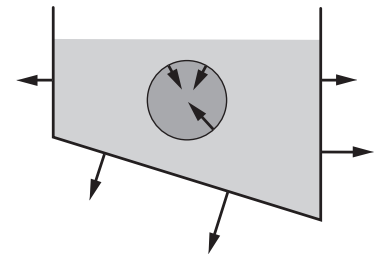
Si un fluido está en equilibrio cada porción de él está en equilibrio. Consideremos una porción cúbica de líquido de volumen  $V$  sumergida en reposo dentro del cuerpo del líquido y efectuemos el análisis dinámico de este sistema. Las fuerzas que recibe son de dos tipos:

- 1) la fuerza gravitatoria ejercida a distancia por la Tierra ( $P$ )
- 2) la fuerza superficial de contacto ejercida por el fluido circundante correspondiente a la presión del entorno. ( $F_{sup}$ )

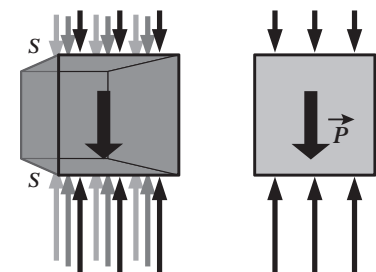
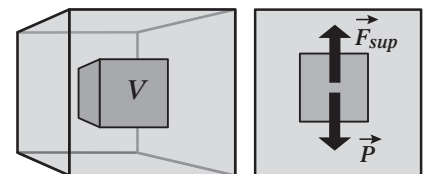
El cubo está en equilibrio por lo que la sumatoria de estas dos fuerzas que recibe es nula. De manera que *el fluido circundante ejerce fuerzas superficiales sobre el cubo cuya resultante es una fuerza vertical hacia arriba de igual módulo que el peso del cubo de fluido*.

El fluido circundante ejerce fuerzas superficiales perpendiculares de compresión sobre cada una de las seis caras del cubo. La resultante de estas fuerzas superficiales es vertical, por lo que las fuerzas horizontales que se ejercen sobre las caras laterales verticales enfrentadas del cubo se contrarrestan.

Dado que el fluido del entorno ejerce globalmente una fuerza vertical, para simplificar dibujaremos sólo las fuerzas superficiales verticales que el cubo recibe sobre las caras horizontales de superficie  $S$ . El carácter distributivo de esas fuerzas está indicado en la figura con varias flechas que se interpretan como fuerza por unidad de área. Para que el peso sea equilibrado por las fuerzas de contacto, la fuerza por unidad de área sobre la cara inferior del cubo debe ser mayor que la fuerza por unidad de área sobre la cara superior. En definitiva, la presión por debajo del cubo es mayor que por encima: *en el seno de un líquido la presión aumenta con la profundidad*.



El líquido ejerce fuerzas perpendiculares de compresión sobre las superficies que contacta.



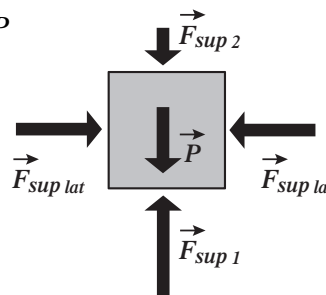
Prohibida la reproducción total o parcial de este material sin el permiso de la cátedra.

$$F_{sup1} - F_{sup2} - P = 0 \Rightarrow F_{sup1} - F_{sup2} = P$$

$$p_1 \cdot S - p_2 \cdot S = \rho \cdot V$$

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho \cdot V}{S} = \rho \cdot d_{12}$$

$d_{12}$  es la distancia entre la cara superior y la inferior,

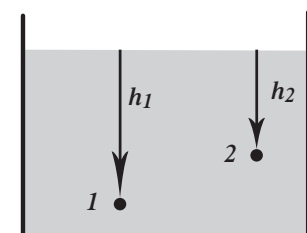


$$p_1 - p_2 = \rho \cdot (h_1 - h_2) = \delta \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

$h$  indica la profundidad (no la altura).

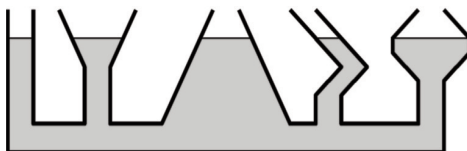
Esto lo enuncia el **Principio Fundamental de la Hidrostática** :

*“La diferencia de presiones entre dos puntos pertenecientes a un mismo líquido en equilibrio, es igual al peso específico del líquido por la diferencia de profundidad.”*



Si consideramos dos recipientes de igual tamaño, llenos, uno con agua y el otro con mercurio (de densidad 13,6 veces la del agua) hasta el mismo nivel, la presión en el fondo debida a esos líquidos no será igual en ambos recipientes: será 13,6 veces mayor para el recipiente que contiene mercurio.

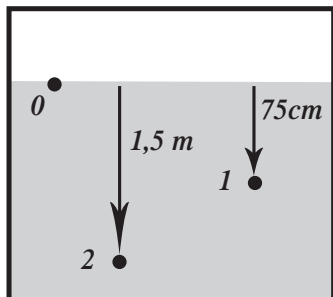
La presión del líquido es la misma para todos los puntos del líquido que se encuentran a la misma profundidad: de otro modo, no habría equilibrio, y el líquido se desplazaría horizontalmente desde los puntos de menor presión hacia los de presión más grande.



En el conjunto de recipientes interconectados de la figura (vasos comunicantes), el líquido alcanza la misma altura en todos los recipientes, con independencia de la forma que tengan. La presión a una dada profundidad es la misma en todos los recipientes.

**Ejemplo**

Un recipiente cerrado contiene dos fases, una líquida y una gaseosa. Se mantiene la fase gaseosa a una presión constante de 2 atm. Si la presión a 75 cm por debajo de la superficie libre es de 3 atm, ¿cuál es la presión a 1,5 m por debajo de la superficie?



Solución:

Una manera de resolver este problema sin plantear ecuaciones es pensar que desde la superficie del líquido hasta los 75 cm de profundidad, la presión pasó de 2 atm a 3 atm, es decir que aumentó en 1 atm al descender 75 cm. Por lo tanto, al descender otros 75 cm, la presión aumentará en 1 atm más, llegando así a valer 4 atm.

Sin embargo, también podemos arribar a esa conclusión utilizando la fórmula del Principio Fundamental de la Hidrostatica (PFH) (es un poco más laborioso, en este caso). Para ello identifiquemos con 0 a la superficie del líquido, con 1 al punto ubicado 75 cm más abajo y con 2 al que está 1,5 m por debajo de la superficie. Aplicando el PFH a los puntos 0 y 1:

$$p_1 - p_0 = \delta \cdot g \cdot h_1 = 3 \text{ atm} - 2 \text{ atm} = 1 \text{ atm}$$

Aplicándolo a los puntos 0 y 2:

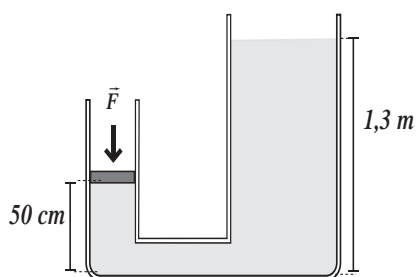
$$p_2 - p_0 = \delta \cdot g \cdot h_2 = \delta \cdot g \cdot 2h_1 = 2\delta \cdot g \cdot h_1 = 2 \text{ atm}$$

Entonces,

$$p_2 = p_0 + 2 \text{ atm} = 2 \text{ atm} + 2 \text{ atm} = 4 \text{ atm}$$

**Ejemplo**

El dispositivo de la figura, que contiene un líquido de densidad 2,2 g/cm<sup>3</sup>, posee un émbolo de peso despreciable en el cilindro de la izquierda, de 2 cm de diámetro. En el cilindro de la derecha, de 20 cm de diámetro, el líquido está en contacto con el aire. La fuerza que habrá que ejercer sobre el émbolo para mantener al sistema en equilibrio será de:



Aplicando el PFH a los puntos ubicados en las superficies del líquido en ambos extremos, la diferencia de presión es:

$$\Delta p = \delta g \Delta h = 2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (1,3 \text{ m} - 0,5 \text{ m}) = 17248 \text{ Pa}$$

El émbolo de la izquierda tiene un área:

$$A = \pi r^2 = 3,14 \cdot (0,01 \text{ m})^2 = 0,000314 \text{ m}^2$$

La fuerza necesaria para mantener el equilibrio es:

$$F = A \Delta p = 0,000314 \text{ m}^2 \cdot 17248 \text{ Pa} = 5,4 \text{ N} = 553 \text{ gf}$$

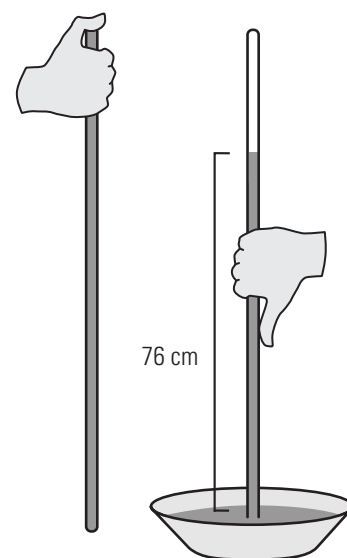
## Cómo medir la presión atmosférica

El barómetro de mercurio, instrumento ideado por Evangelista Torricelli (1608-1647) y utilizado para medir la presión atmosférica, consiste en un tubo de ensayo largo, de vidrio, cerrado en un extremo, lleno de mercurio. Cuando el tubo se invierte sobre un recipiente que contiene también mercurio, se derrama una parte dentro del recipiente y el nivel del mercurio dentro del tubo baja hasta que se estabiliza cuando la columna es de unos 76 cm. El espacio generado arriba del mercurio, solo contiene vapor de mercurio, cuya presión es muy pequeña a temperatura ambiente. El hecho es que la presión en la superficie libre de mercurio en contacto con el aire (la presión atmosférica), es la misma que la que tiene el mercurio dentro de la probeta a esa misma altura. En definitiva la presión en la base de la columna de mercurio de 76 cm es igual a la presión en la base de los 100 km de aire atmosférico. Vivimos sumergidos en un mar de aire.

La presión atmosférica normal se estandariza como la presión en la base de una columna de mercurio de 76 cm a una temperatura de 0 °C en un lugar donde la gravedad vale 9,80665 m/s<sup>2</sup>.

A partir del PFH podemos comprobar que 760 mmHg corresponden al valor conocido de la presión atmosférica normal en hectopascuales.

$$p_{atm} = \delta_{Hg} g h = 13.595,1 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,80665 \frac{m}{s^2} \cdot 0,76 m \approx 101.325 Pa = 1013,25 hPa$$



### El experimento de Torricelli.

En honor a Torricelli, el mmHg también se denomina *torr*.

### Ejemplo

En las estaciones de servicio todavía se acostumbra medir la presión del aire de los neumáticos en lbf/plg<sup>2</sup>, también conocida como *psi*. La libra fuerza es una unidad de fuerza que equivale a 0,454 kgf y la pulgada es una unidad de longitud igual a 2,54 cm (basada en el ancho del dedo pulgar a la altura de la base de la uña).

$$1 \text{ lbf/plg}^2 = 0,454 \text{ kgf} / (2,54 \text{ cm})^2 = 0,07 \text{ kgf/cm}^2 = 7000 \text{ Pa}.$$

¿Cuál es la presión del aire, en atmósferas, de un neumático de automóvil que está inflado a 32 lbf/plg<sup>2</sup>?

Solución:

$$32 \text{ lbf/plg}^2 = 32 \times 0,07 \text{ atm} = 2,2 \text{ atm}$$

Los 32 lbf/plg<sup>2</sup> se agregan por encima de la presión atmosférica (que tiene el neumático aunque esté "desinflado"), de modo que la presión del aire del neumático es, en realidad, de 3,2 atm (2,2 atm + 1 atm) = 46 lbf/plg<sup>2</sup>.

### Presión absoluta y presión manométrica

En el ejemplo anterior para distinguir la manera de expresión decimos que el valor de 46 lbf/plg<sup>2</sup> ó 3,2 atm corresponde a la presión absoluta (o presión, simplemente), mientras que los valores de 32 lbf/plg<sup>2</sup> ó 2,2 atm corresponden a la presión manométrica. Los manómetros son instrumentos utilizados para medir la presión, y la mayoría de ellos mide la diferencia de presión entre la que se quiere medir y la presión atmosférica, es decir la presión manométrica.

### Ejemplo

Se conoce la presión absoluta en tres puntos de una cañería y resultan 110 cmHg, 90 cmHg y 70 cmHg. ¿Cuáles son las correspondientes presiones manométricas?

Solución:

Las presiones manométricas se obtienen restando la presión atmosférica (76 cmHg) a las presiones absolutas. Los resultados son 34 cmHg, 14 cmHg y -6 cmHg.



**Presiones negativas.** ¿Puede la presión absoluta en un líquido ser negativa? ¿Y la manométrica?

El cmHg y su hermano menor, el mmHg, diez veces más chico, también denominado *torr*, es habitualmente utilizado en la medicina para indicar la presión sanguínea. Como esta última oscila debido a los latidos del corazón, se acostumbra indicar dos valores, el máximo y el mínimo y escuchamos, por ejemplo, “doce ocho”, que significa 12 cmHg de máxima y 8 cmHg de mínima.

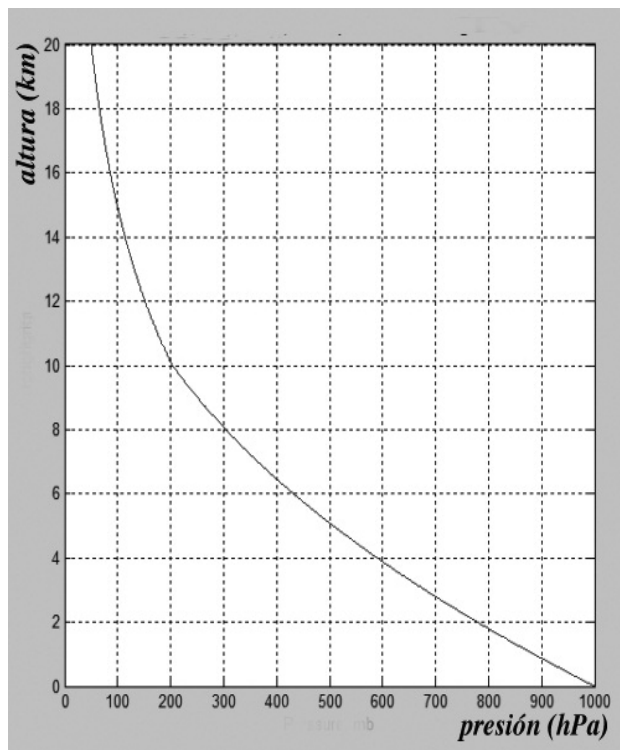
Si la presión sanguínea de una persona oscila entre 12 y 8 cmHg y la presión del aire exterior es de 76 cmHg, en una herida debería entrar aire, en lugar de salir sangre, como realmente ocurre. ¿Qué es lo que no funciona en este argumento?

Además del cmHg y el mmHg, también podemos hablar de “metros de agua” (mH<sub>2</sub>O): 10 mH<sub>2</sub>O = 76 cmHg, aproximadamente. La presión en el fondo del mar de aire en el que vivimos es equivalente a la que hay en la base de una columna de 10 m de agua.

### Sistemas de unidades

	pascal (Pa)	bar (bar)	milibar (mbar)	atmósfera técnica (at)	atmósfera (atm)	torr (Torr)	libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi)
1 Pa	1 N/m <sup>2</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-2</sup>	1,0197×10 <sup>-5</sup>	9,8692×10 <sup>-6</sup>	7,5006×10 <sup>-3</sup>	145,04×10 <sup>-6</sup>
1 bar	100.000	10 <sup>6</sup> dyn/cm <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	1,0197	0,98692	750,06	14,5037744
1 mbar	100	10 <sup>-3</sup>	1 hPa	0,0010197	0,00098692	0,75006	0,0145037744
1 at	98.066,5	0,980665	980,665	1 kgf/cm <sup>2</sup>	0,96784	735,56	14,223
1 atm	101.325	1,01325	1.013,25	1,0332	1	760	14,696
1 Torr	133,322	1,3332×10 <sup>-3</sup>	1,3332	1,3595×10 <sup>-3</sup>	1,3158×10 <sup>-3</sup>	1 mm Hg	19,337×10 <sup>-3</sup>
1 psi	6,894×10 <sup>3</sup>	68,948×10 <sup>-3</sup>	68,948	70,307×10 <sup>-3</sup>	68,046×10 <sup>-3</sup>	51,715	1 lbf/plg <sup>2</sup>

### Variaciones de la presión y densidad del aire de la atmósfera a distintas alturas.



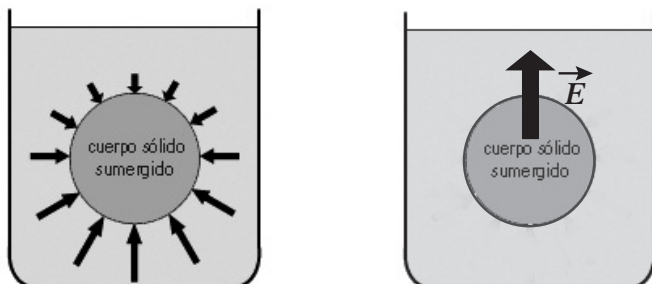
Altura (m)	Presión (hectopascales)	Densidad (kg · m <sup>-3</sup> )
0	1013	1,226
1000	898,6	1,112
2000	794,8	1,007
3000	700,9	0,910
4000	616,2	0,820
5000	540	0,736
10000	264,1	0,413
15000	120,3	0,194

Si bien la atmósfera tiene una altura de casi 100 km, a 10 km del suelo la presión atmosférica es apenas del 20 % de la presión a nivel del mar. ¿Cómo se explica esta desproporción? Si el TFH dice que la diferencia de presión entre dos puntos es proporcional a la diferencia de altura entre ellos, ¿por qué el gráfico de la izquierda no es una recta?



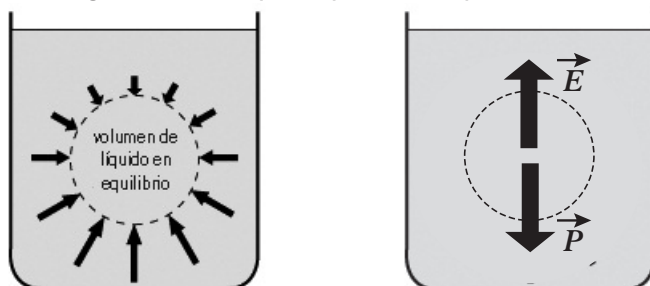
## Principio de Arquímedes

Cuando un objeto se encuentra sumergido total o parcialmente en un fluido en reposo, el líquido presiona sobre el objeto. Aparecen entonces fuerzas perpendiculares a la superficie del objeto y, como la presión crece con la profundidad, la parte inferior del objeto recibe más fuerza que la parte superior. El resultado de todas esas fuerzas es una fuerza vertical, dirigida hacia arriba, denominada *empuje*.



En un cuerpo sumergido las fuerzas que empujan desde abajo superan a las que empujan desde arriba y, por eso, el fluido ejerce una fuerza (empuje) dirigida hacia arriba.

Cualquier cuerpo íntegramente sumergido, independientemente del material de que está hecho, desplaza una porción de fluido de igual forma y volumen que la del propio cuerpo. La porción de fluido que ha de "sacarse" para hacer lugar al cuerpo está en equilibrio con su entorno por lo que, como vimos en la pág. 5, el fluido circundante le ejerce fuerzas superficiales cuya resultante es una fuerza vertical hacia arriba de igual módulo que el peso de la porción de dicho fluido.



El módulo del empuje es igual al del peso del líquido desalojado.

Al reemplazar el líquido por el cuerpo intruso el entorno no se ha modificado, por lo tanto ejercerá sobre el cuerpo de reemplazo la misma fuerza que recibía la porción de líquido desalojada.

Esta situación se expresa mediante el **Principio de Arquímedes**:

*"Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje vertical de abajo hacia arriba igual al peso del fluido que desaloja". Esta fuerza recibe el nombre de empuje hidrostático.*

De acuerdo con el principio de Arquímedes, el empuje ( $E$ ) se puede expresar como:

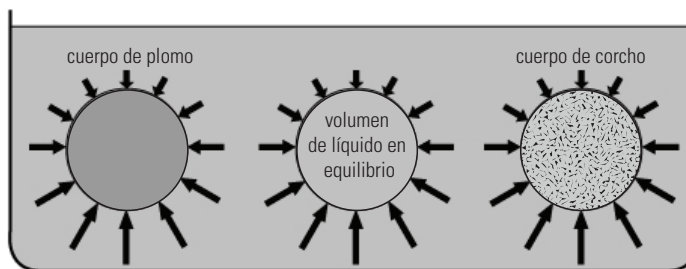
$$E = P_{\text{fluido desalojado}} = m_{\text{fluido desalojado}} \cdot g = \delta_{\text{fluido}} \cdot g \cdot V_{\text{fluido desalojado}}$$

donde,  $m$  es la masa y  $V$  el volumen.

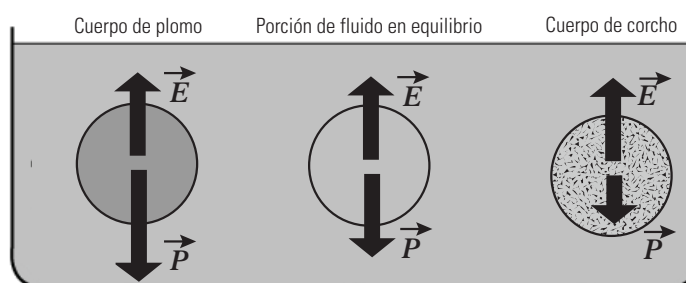
El empuje actúa verticalmente hacia arriba y se puede considerar aplicado en el centro de gravedad del fluido desalojado por el cuerpo (siempre que el cuerpo esté rodeado de fluido, para que la fuerza de empuje sea vertical). Ese punto recibe el nombre de *centro de flotación* o *de carena*.

### Hundirse o flotar

El empuje que recibe el cuerpo depende del volumen del cuerpo sumergido y no de su peso. El valor del empuje es igual al del peso de la porción de líquido que desplaza.



Un cuerpo sumergido completamente en un fluido se hundirá o flotará según cuál sea la relación entre su propio peso y el empuje (que es igual al del peso del líquido que desaloja).



Adiós mundo cruel

Si la densidad del cuerpo es mayor que la del fluido, el cuerpo tiene un peso mayor al peso del fluido que desaloja, y entonces se hunde hasta llegar al fondo

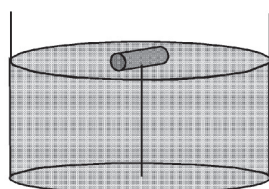
Si la densidad media del cuerpo es igual que la del fluido, el cuerpo tiene un peso igual al peso del fluido que desaloja, y entonces flota "a media agua", es decir completamente sumergido.

Si la densidad del cuerpo es menor que la del fluido, el cuerpo tiene un peso menor al peso del fluido que desaloja, entonces el cuerpo sube hasta la superficie y flota semisumergido. En el equilibrio, el cuerpo flotante está sumergido parcialmente de manera que el peso del líquido desalojado equipare exactamente a su peso.

Del principio de Arquímedes surge que:

- $\delta_{\text{cuerpo}} > \delta_{\text{fluido}}$  entonces se hunde
- $\delta_{\text{cuerpo}} = \delta_{\text{fluido}}$  entonces flota completamente sumergido
- $\delta_{\text{cuerpo}} < \delta_{\text{fluido}}$  entonces flota parcialmente sumergido

#### Ejemplo



En la figura se observa un cilindro de  $2 \text{ m}^3$  unido mediante una cuerda ideal (inextensible y de masa despreciable) al fondo de un recipiente lleno de agua (densidad  $1 \text{ kg/dm}^3$ ). En estas condiciones el cilindro tiene sumergida la mitad de su volumen. Si la densidad del cilindro es de  $100 \text{ kg/m}^3$ , ¿qué tensión tiene la cuerda?

Solución:

El cilindro está en equilibrio bajo la acción de tres fuerzas: su peso  $P$  (hacia abajo), el empuje del agua  $E$  (hacia arriba) y la tensión de la soga  $T$  (hacia abajo):

$$E - P - T = 0 \Rightarrow T = E - P$$

$$T = \delta_{\text{agua}} \cdot g \cdot V_{\text{sumergido}} - \delta_{\text{cilindro}} \cdot g \cdot V_{\text{cilindro}} = (\delta_{\text{agua}} \cdot V_{\text{sumergido}} - \delta_{\text{cilindro}} \cdot V_{\text{cilindro}}) \cdot g =$$

$$= (1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{ m}^3 - 100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \text{ m}^3) \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 8000 \text{ N}$$



De acuerdo a Vitruvio, arquitecto de la antigua Roma, Hierón II, tirano gobernador de Siracusa, le pidió a Arquímedes determinar si una nueva corona triunfal había sido fabricada con oro sólido o si el orfebre, que creía deshonesto, le había agregado plata. Arquímedes tenía que resolver el problema sin dañar la corona, (ya que su vida estaba en juego) así que no podía fundirla y convertirla en un cuerpo regular para calcular su densidad. Mientras tomaba un baño, notó que el nivel de agua subía en la bañera cuando entraba, y así se dio cuenta de que ese efecto podría usarse para determinar el volumen de la corona. Debido a que la compresión del agua sería despreciable, la corona, al ser sumergida, desplazaría una cantidad de agua igual a su propio volumen. Al dividir la masa de la corona por el volumen de agua desplazada, se podría obtener la densidad de la corona. La densidad de la corona sería menor si otros metales más baratos y menos densos le hubieran sido añadidos. Entonces, Arquímedes, tan emocionado estaba por su descubrimiento que salió corriendo desnudo por las calles, gritando "¡Eureka!" (¡Lo he encontrado!, en griego antiguo).

### Actividad. La muerte de las ballenas

¿Cuál es la causa de la muerte de las ballenas que quedan varadas en la playa?

- Se les seca la piel por la falta de contacto con el agua.
- Mueren de tristeza al quedar separadas de sus semejantes.
- La falta de alimento.
- La radiación ultravioleta del sol les produce daños en la piel.
- No pueden respirar porque sus branquias no funcionan fuera del agua.
- No tienen la fuerza suficiente para inflar sus pulmones.

Solución:

La respuesta correcta es la (f). La ballena es un mamífero, tiene pulmones, y respira de una manera semejante a nosotros. Para inflar sus pulmones tiene que expandir el tórax mediante la acción muscular. En el agua no tiene dificultad porque al expandir el tórax, puede desplazar el agua que tiene debajo y su centro de masa permanece más o menos en el mismo lugar (en realidad sube un poco porque aumenta el empuje). En la playa, al estar apoyada sobre el suelo, no puede desplazar el suelo hacia abajo, con lo que para poder expandir el tórax tiene que elevar su centro de masa: eso implica una fuerza enorme que excede sus posibilidades musculares: la causa de la muerte es la asfixia. La situación se ilustra a continuación:

