

Figura No. 15

En honor a Torricelli, a un mm de mercurio se le conoce con el nombre de Torr, que también es una unidad de medida de la presión.

Otro tipo de barómetro es el llamado aneroide, que basa su funcionamiento en una cámara flexible sobre la cual actúa la presión atmosférica, haciendo que aumente o disminuya su volumen. Esta cámara flexible está acoplada a una aguja que se mueve por una escala indicando la presión atmosférica existente.

PRINCIPIO DE PASCAL

Analicemos de nuevo la expresión de la presión en el interior del volumen de un líquido:

$$P - P_0 = \rho g h$$

de la cual podemos ver que la diferencia entre las presiones sólo depende de la densidad del líquido, de la aceleración de la gravedad y de la altura.

Consideremos dentro del volumen de un líquido dos puntos, A y B, situados a diferentes profundidades, de tal forma que la diferencia de las profundidades entre los dos puntos es h. (ver figura 16). La diferencia entre las presiones en A y en B, solo depende de la densidad del líquido, de la aceleración de la gravedad y de la altura h, por ello:

$$P_A - P_B = \rho g h$$

Si por alguna causa, la presión en A aumenta en un valor dP, la presión en B tiene que aumentar en un valor igual dP, pues si no fuera así la ecuación dada estaría incorrecta y sabemos que es correcta. O sea:

$$(P_A + d_P) - (P_B + d_P) = \rho g h$$

Observe que aquí se está suponiendo, que al aumentar la presión, la densidad sigue con el mismo valor, lo cual ya se había explicado, es válido para líquidos, pero no para gases.

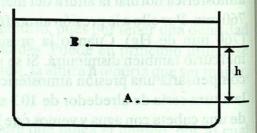


Figura No. 16

El aumento de la presión, en el punto A, puede ser provocado por cualquier causa. Por ejemplo puede que, si el recipiente es abierto, la presión atmosférica aumente; si es un recipiente cerrado, generalmente el aumento de la presión se debe al movimiento de un pistón oprimiendo el líquido (ver figura).

El análisis que hemos hecho, basado en la ecuación de la presión en el interior de un líquido, nos lleva al enunciado de un principio de la Hidrostática, conocido con el nombre de *Principio de Pascal* y que se formula de la siguiente forma:

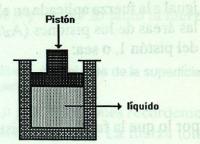


Figura No. 17

Los cambios de presión, en cualquier punto en un fluido encerrado y en reposo, se trasmiten a todos los puntos del fluido y actúan en todas direcciones.

Este principio fue descubierto por Blaise Pascal(1623 -1662), matemático, físico y teólogo francés, en forma experimental. Ahora, como ya hemos visto, se puede obtener a partir de la aplicación de la ecuación de la presión en el interior de un líquido.

El principio de Pascal se aplica en muchos dispositivos que se utilizan en la vida diaria y en la industria. El ejemplo más típico es el de las máquinas hidráulicas como pueden ser los elevadores y prensas hidráulicas. En estos dispositivos se utiliza un sistema de pistones, llenos de líquido, para "multiplicar" la fuerza aplicada.

Así supongamos que tenemos 2 cilindros, con sus pistones. El cilindro 1 con un área A_1 y el cilindro 2 con un área A_2 . Ambos están conectados y totalmente llenos de un líquido, generalmente aceite. Si sobre el pistón del cilindro 1 se ejerce una fuerza F_1 , ésta provoca un aumento de la presión en el líquido de:

$$P = \frac{F_1}{A_1}$$

Como ya se ha dicho, según el principio de Pascal, el líquido trasmite la presión sin cambio, por lo que en el cilindro 2 existirá una presión igual, que actuará sobre el pistón del cilindro 2, haciendo que éste ejerza una fuerza igual a:

$$F_2 = P \cdot A_2$$

Sustituyendo aquí la expresión para la presión P, ob- A-_tenemos:

$$F_2 = (\frac{F_1}{A_1}) \cdot A_2 = F_1(\frac{A_2}{A_1})$$

Como se puede ver la fuerza obtenida en el pistón 2 es

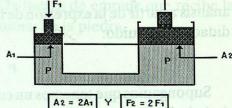


Figura No. 18

 $\left(\frac{A_2}{A_2}\right) = 2$

por lo que la fuerza en el pistón 2 será dos veces la fueza aplicada en el pistón 1:

$$F_2 = 2F_1$$

de lo que se ve que la fuerza obtenida es el doble de la aplicada. Note que ésto es una consecuencia del principio de Pascal, pues se consideró que la presión se trasmite del pistón 1 al 2 sin cambio.

El conocido gato hidráulico, utilizado para elevar los automóviles, funciona en base a este principio. Asimismo los frenos hidráulicos de los vehículos y las prensas utilizadas para comprimir materiales.

Existen equipos similares que funcionan con aire, como los sistemas para abrir y cerrar las puertas en los autobuses, y que en este caso se denominan máquinas neumáticas.

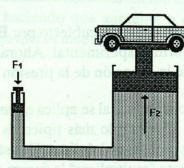


Figura No. 19

PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

El otro principio fundamental de la hidrostática es el principio de Arquímedes, que nos permite explicar el hecho de que los cuerpos floten en los fluidos.

El principio de Arquímedes es también una consecuencia de la dependencia de la presión, dentro del fluido, con la profundidad. Por ello vamos a comenzar el análisis a partir de la expresión de la presión con la profundidad, en el fluido:

$$P - P_0 = \rho g h$$

Supongamos que tenemos un cuerpo, en forma de cubo de lado H. Lo sumergimos totalmente en un líquido, de forma que su superficie superior esté a una profundidad h de la superficie del líquido.

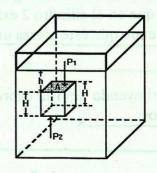


Figura No. 20

Sobre la superficie superior del cuerpo actúa una presión de ρ g h y por lo tanto la fuerza sobre esa superficie será de:

$$F_1 = \rho g h A$$
 dirigida hacia abajo. A es el área de la superficie superior del cuerpo.

Sobre la superficie inferior del cuerpo actúa una presión de ρ g (h + H), pues recordemos que esta superficie está a diferente profundidad, que la superficie superior. La fuerza total sobre la superficie inferior del cuerpo será de:

$$F_2 = \rho g (h + H)A$$
 so axion at ab basing at at our avisació

y dirigida hacia arriba. De estas ecuaciones vemos que sobre el cuerpo actúa una fuerza resultante, dirigida hacia arriba y que podemos calcular restando las fuerzas F₂ y F₁ lo que nos daría:

$$E = F_2 - F_1 = \rho g(h+H)A - \rho ghA$$

o sea:

$$= \rho \ gHA$$
 que es la llamada fuerza de empuje o fuerza de flotación (E).

Analizando la expresión de la fuerza de empuje obtenida, vemos que el producto de H por A (altura del cuerpo por el área de su superficie), no es más que el volumen del cuerpo V, E = ρ gV. El volumen del cuerpo por la densidad del líquido nos da la masa de líquido desplazada por el cuerpo sumergido. Esta masa multiplicada por la aceleración de la gravedad nos da el peso del volumen del líquido desplazado por el cuerpo sumergido.

O sea que la fuerza de empuje que recibe el cuerpo, es numéricamente igual al peso del líquido desplazado por el cuerpo. Este es el enunciado del principio de Arquímedes:

Un cuerpo sumergido recibe una fuerza de empuje igual al peso del fluido que desplaza.

Este principio es válido para líquidos y gases, pues ambos son fluidos.

Cuando sostenemos una piedra dentro del agua notamos que pesa menos que en el aire. Esto se debe precisamente a que sobre la piedra está actuando la fuerza de empuje, dirigida hacia arriba, y que nos ayuda a sostenerla. La magnitud de la fuerza de empuje que recibe la piedra, es igual al peso de un volumen de agua igual al volumen de la piedra.

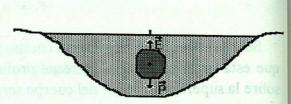
Determinar la fuerza de empuje que actúa sobre una piedra de 1.6 m³ de volumen, sumergida en una alberca de agua dulce ($\rho_{agua} = 1~000~kg/m^3$).

$$V = 1.6 \text{ m}^{3}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^{3}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^{2}$$
Solución:
$$E = g \rho V$$

$$E = 9.8 \text{ m/s}^{2} \times 1000 \text{ kg/m}^{3} \times 1.6 \text{ m}^{3} = 15680 \text{ N}$$



Observe que la magnitud de la fuerza de empuje está directamente relacionada con el volumen del cuerpo, y por tanto con el peso del volumen de líquido desplazado por el cuerpo. Si un cuerpo está

Figura No. 21

totalmente sumergido en el líquido desplaza un volumen de líquido igual a su propio volumen. Si está parcialmente sumergido desplaza un volumen de líquido menor que su propio volumen, pero igual al volumen del cuerpo que esté sumergido.

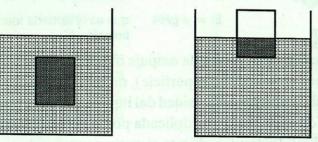


Figura No. 22

Note que la fuerza de empuje no está relacionada con el peso del cuerpo. Cuerpos de igual volumen, pero diferentes pesos, totalmente sumergidos en un fluido, sufren iguales fuerzas de empuje.

A partir del principio de Arquímedes podemos analizar la flotación de los cuerpos. ¿De qué depende que un cuerpo flote en el agua y otro no? ¿Por qué un cuerpo de madera maciza flota en el agua, pero uno, de igual volumen, de hierro macizo se hunde?.

Para responder estas preguntas debemos partir de que la fuerza que tiende a que el cuerpo flote es la fuerza de empuje (E) y la que tiende a que el cuerpo se hunda es el peso del cuerpo(P). En dependencia de la relación entre estas 2 fuerzas se pueden tener 3 situaciones:

- 1. La fuerza de empuje es menor que el peso del cuerpo (E < P). En este caso el cuerpo se hundirá.
- 2. La fuerza de empuje es igual al peso del cuerpo (E = P). El cuerpo puede flotar en cualquier posición dentro del fluido.

3. La fuerza de empuje es mayor que el peso del cuerpo (E>P). El cuerpo se moverá hacia la superficie del fluido y comenzará a salirse del fluido. Al disminuir el volumen de fluido desplazado disminuirá la fuerza de empuje y cuando sea igual al peso, el cuerpo quedará flotando. En este caso el peso del volumen de fluido desplazado será igual al peso del cuerpo.

Ejemplo No. 10 Si la densidad de la piedra es de 2 8000 kg/m³, ¿podría flotar la piedra en la alberca?

Datos:
$$V = 1.6 \text{ m}^3$$
 $\rho_c = 2\,800 \text{ kg/m}^3$ $G = 9.8 \text{ m/s}^2$ $E = 15\,680 \text{ N}$ Solución: $W = \text{mg}$ $W = \rho \text{ V g}$ $W = 2\,800 \text{ kg/m}^3 \times 1.6 \text{ m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 43\,904 \text{ N}$

Como se observa el peso es mayor que el empuje, por lo que la piedra se hundirá en el agua.

Podemos analizar estas relaciones a partir del concepto de densidad. La densidad del cuerpo es la masa del cuerpo dividida por el volumen del mismo. Observe que no es lo mismo la densidad del cuerpo, que la densidad del material del que esté hecho el cuerpo. Un barco de hierro tiene una densidad menor que la densidad del hierro, ya que no es un cuerpo compacto.

El peso del cuerpo es igual a su densidad(ρ_c), multiplicada por el volumen(V) del cuerpo y por la aceleración de la gravedad(g). La fuerza de empuje es igual a la densidad del fluido(ρ), multiplicada por el volumen(V) del cuerpo y por la aceleración de la gravedad(g).

Por ello, comparando ambas fuerzas:

$$P = \rho_c Vg$$

 $E = \rho Vg$

De donde puede verse que si la densidad del cuerpo es mayor que la densidad del fluido, el peso del cuerpo será mayor que el empuje (P > E) y el cuerpo se hundirá. Si por otra parte la densidad del cuerpo es menor que la del fluido, el peso será menor que el empuje (P < E) y el cuerpo flotará.

Un tronco de árbol, con forma de cilindro de 0.25 metros de diámetro y 4 metros de largo, cae al río. Si la densidad de la madera del tronco es de 610 kg/m³, determine si el tronco flotará en el agua del río.

Datos:

$$d = 0.25 \text{ m}$$

 $L = 4 \text{ m}$
 $\rho_{\text{madera}} = 610 \text{ kg/m}^3$
 $\rho_{\text{agua}} = 1 000 \text{ kg/m}^3$
 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

Peso del tronco.

 $m = \rho_{madera} V$

La masa del tronco es igual a la densidad por el volumen del tronco.

 $V = \pi r^2 L = \pi d^2 L g / 4$ $V = 3.14 \times (0.25 \text{ m})^2 \times 4 \text{ m}/4 = 0.1962 \text{ m}^3$

El volumen del tronco se calcula por la fórmula del volumen de un cilindro.

$$P = \rho_{\text{madera}} \pi \, d^2 \, \text{L g/4}$$

$$P = 610 \, \text{kg/m}^3 \, \text{x} \, 3.14 \, \text{x} \, (0.25 \, \text{m})^2 \, \text{x} \, 4 \, \text{m} \, \text{x} \, 9.8 \, \text{m/s}^2$$

$$P = 1.173.18 \, \text{N}$$

Sustituyendo en la fórmula.

La fuerza de empuje, cuando el tronco está completamente sumergido, es igual al peso del volumen del líquido desplazado por todo el tronco:

$$E = \rho_{agua} V g$$

$$E = \rho_{agua} \pi d^2 L g / 4$$

$$E = 1 000 \text{ kg/m}^3 \times 3.14 \times (0.25 \text{ m})^2 \times 4 \text{ m} \times 9.8$$

$$\text{m/s}^2 / 4$$

$$E = 1 923.25 \text{ N}$$

Como se ve la fuerza de empuje es mayor que el peso, por lo que el tronco flotará. Observe que se asumió que el volumen del agua desplazada por el tronco es igual al volumen del tronco, considerando que el tronco estaba completamente sumergido. Así el tronco comienza a moverse hacia la superficie del agua y parte de él saldrá del río, quedando una parte dentro del agua y una parte fuera. ¿Qué parte del tronco quedará dentro del agua?

Para responder debemos recordar que la ascensión del tronco se detiene cuando el empuje sea iqual al peso del tronco. Por ello:

$$E = \rho_{agua} V_{sumergido}.g = P = \rho_{madera} V g$$

Observe que aquí se considera diferente el volumen sumergido (V_{sumergido}) al volumen del tronco completo (V).

$$\rho_{\text{agua}} \, V_{\text{sumergido}} = \rho_{\text{madera}} \, V$$

De donde podemos obtener el volumen sumergido:

$$V_{\text{sumergido}} - \rho_{\text{madera}} V / \rho_{\text{agua}}$$
 $V_{\text{sumergido}} = 610 \text{ kg/m}^3 \times 0.1962 \text{ m}^3 / 1000 \text{ kg/m}^3$
 $V_{\text{sumergido}} = 0.1197 \text{ m}^3$

Cada barco, submarino o dirigible debe diseñarse de tal forma que desplace un volumen de fluido, cuyo peso sea igual al peso propio. Así un barco de 10 000 toneladas se construye lo bastante amplio para que desplace 10 000 toneladas de agua antes de que se hunda demasiado. En el caso de los submarinos se varía su peso haciendo entrar agua o aire en sus tanques interiores; la fuerza de empuje depende de su volumen, que es constante, mientras esté sumergido totalmente. Cuando el submarino debe sumergirse se hace entrar agua en los tanques,

aumenta el peso y se sumerge; para mantenerlo a una profundidad constante debe lograrse que el peso sea igual a la fuerza de empuje y para salir a la superficie hay que disminuir el peso, para lo cual expulsan agua de los tanques, mediante aire comprimido. Esto es independiente de los timones, que le permiten variar la profundidad cuando se mueven en el agua.

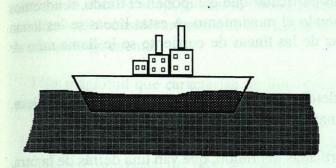


Figura No. 23

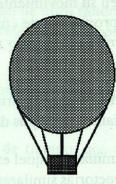


Figura No. 24

Las personas que no pueden flotar se debe a que tienen una densidad media de sus cuerpos grande, comparada con la del agua; generalmente son personas musculosas y por ello tienen mayor densidad. Por otra parte en el mar es más fácil flotar que en una alberca, pues el agua de mar tiene mayor densidad que el agua dulce.

FLUIDOS EN MOVIMIENTO

Comenzaremos ahora el estudio de los fluidos en movimiento. La parte de la Física que se dedica al estudio de los fluidos en movimiento se denomina Dinámica de los fluidos. Existen muchas situaciones en las que observamos fluidos en movimiento: el agua al correr por las tuberías, ríos, el viento, el aire empujado por un abanico, etc. En dependencia del fluido que se esté analizando podemos diferenciar la hidrodinámica, cuando se trata de líquidos y la aerodinámica, cuando se trata de gases, fundamentalmente el aire.

La dinámica de los fluidos ha sido desarrollada a lo largo de mucho tiempo, gracias al trabajo de muchos científicos como Newton, Bernoulli, Pascal, etc. La hidrostática, estudiada anteriormente, puede considerarse como un caso particular de la hidrodinámica, cuando la velocidad del líquido es cero.

Por cuanto es imposible desarrollar todos los aspectos de la hidrodinámica, trataremos sólo los fundamentales.

TIPOS DE FLUJO

Cuando observamos un fluido en movimiento, como puede ser el humo de un cigarro o el agua que sale de la llave, podemos ver que al inicio del chorro el movimiento del fluido es