Física e introducción a la biofísica
UBA-CBC

Unidad 2

Bases físicas
de la circulación y de la respiración

Autores:

Jorge Sztrajman

Cecilia Sobico

Jorge Nielsen

Revisión:
Diana Skigin
María Inés Braga Menéndez

Esta es la segunda unidad de las cuatro de un libro en elaboración por profesores de la *Cátedra de Física del Ciclo Básico Común de la Universidad de Buenos Aires.*
Su contenido se ajusta al programa de la materia *Física e Introducción a la Biofísica*.

Diseño editorial:
Cecilia Sobico

Septiembre de 2009

1. FLUIDOS

1._a. Introducción

Los *fluidos* son los *líquidos* y los *gases*. A diferencia de los sólidos, los fluidos pueden adaptar su forma a la del recipiente que los contiene. El volumen de los líquidos depende muy poco de las fuerzas externas a las que están sometidos y por ello se los puede considerar prácticamente incompresibles; el volumen de los gases, en cambio, es fácilmente modificable. Los fluidos tienen mucha importancia para los seres vivos, que están formados, en gran parte, por agua e intercambian gases con la atmósfera.

Fuerza versus presión

En el caso de los sólidos el concepto de fuerza es muy útil porque un medio sólido, como por ejemplo una soga, transmite la fuerza. Sin embargo, al aplicar fuerzas a través de medios fluidos, por ejemplo mediante una jeringa, la fuerza aplicada se transmite cambiando apreciablemente de valor. Para los fluidos, el concepto más útil es el de *presión*. La presión que una misma fuerza produce depende de la superficie sobre la cual se aplique; de allí que clavamos los clavos de punta y no de cabeza y que caminamos sobre la nieve con raquetas o con esquíes. (Ver recuadro a la izquierda: **Esfuerzo normal de compresión**).

Esfuerzo normal de compresión
En rigor, para cuerpos sólidos en vez de usar la palabra *presión* se habla de *esfuerzo normal* (perpendicular al plano donde actúa) *de compresión* (que empuja). En un fluido ideal las moléculas sólo pueden empujarse, pero en un sólido también pueden "tirar" (*esfuerzo normal de tracción*) y "arrastrar" (*esfuerzo tangencial o de corte*).

Para comprender la idea de presión consideremos el caso de una persona de 120 kgf de peso, parada sobre las suelas de sus zapatos que, entre ambas tienen un área de 200 cm². El peso de la persona está repartido, de modo que sobre cada cm² actúan 0,6 kgf.

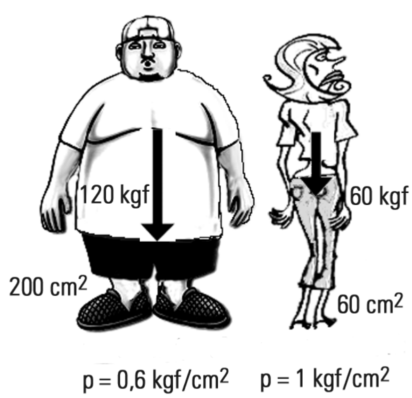
Otra manera de decir esto es definir la presión p en el suelo como el cociente entre el módulo de la fuerza aplicada perpendicularmente sobre el suelo (en este caso equivalente al peso) y el área A de las suelas:

$$p = \frac{|\vec{F}_\perp|}{A} = \frac{P}{A_{suela}} = \frac{120\ kgf}{200\ cm^2} = 0{,}6\ \frac{kgf}{cm^2}$$, donde $\vec{F}_\perp$

es la fuerza ejercida perpendicularmente a la superficie de área A.

Si ahora consideramos una persona de 60 kgf distribuyendo su peso sobre un área menor de, digamos, 60 cm² (podría ser una mujer con tacos altos), la presión en el suelo es:

$$p = \frac{|\vec{F}_\perp|}{A} = \frac{60\ kgf}{60\ cm^2} = 1\ \frac{kgf}{cm^2}.$$



Aunque el peso de la persona en este último caso es menor que en el anterior, la presión resulta mayor, debido a que el peso está repartido en un área menor.

En general, los objetos que realizan grandes presiones reparten las fuerzas sobre áreas muy pequeñas como filos o puntas, como por ejemplo agujas, tenedores, cuchillos y clavos. En cambio, cuando hace falta que la presión sea chica, como en el caso de un vehículo para la arena, recurrimos a cubiertas de gran área de contacto con el suelo.

Al contrario de la fuerza, que es una magnitud vectorial, la presión es una magnitud escalar: no posee dirección ni sentido.

¿eh? ¿eh? ¿eh?

¿Por qué nos podemos cortar con el borde de una hoja de papel?

Aunque la fuerza ejercida sobre el papel sea chica, el borde tiene un área tan reducida que el cociente entre la fuerza y el área, la presión, alcanza un valor importante y por eso nos puede cortar.

Unidades de presión

Ya mencionamos una unidad habitual para la presión: el kgf/cm^2. Otra unidad bastante utilizada es el valor de la presión asociada a la fuerza que la atmósfera ejerce sobre el suelo y sobre todos los objetos, la presión atmosférica. Su valor medio a nivel del mar se denomina una *atmósfera* (1 atm) y vale, aproximadamente, 1 kgf/cm^2 (*atmósfera técnica*, at). La relación más precisa es 1 atm = 1,033 at = 1,033 kgf/cm^2. Muchas veces usaremos la relación aproximada 1 kgf/cm^2 = 1 atm.

Sin embargo, la unidad de presión del Sistema Internacional (SI) es el N/m^2 que recibe el nombre de pascal (1 Pa = 1 N/m^2). Se trata de una unidad muy pequeña comparada con la atm, puesto que se basa en el newton (más pequeño que el kgf) repartido en 1 m^2 = 10.000 cm^2. Para averiguar la relación entre el kgf/cm^2 y el Pa, hagamos:

$$1\ kgf/cm^2 \cong 10\ N / 10^{-4}\ m^2 = 10^5\ N/m^2 = 10^5\ Pa.$$

En los informes meteorológicos suelen expresar la presión atmosférica en *hectopascales* (hPa, hecto = cien). Una presión de 1000 hPa equivale a 10^5 Pa, que según el cálculo anterior coincide, aproximadamente con el valor de la presión atmosférica (en rigor, la presión atmosférica normal es de 1013,25 hPa).

En las estaciones de servicio todavía se acostumbra medir la presión del aire de los neumáticos en lb/plg^2, también conocida como psi (las iniciales de *pound per square inch*, libras por pulgada cuadrada, en inglés). La libra 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).

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

Ejemplo

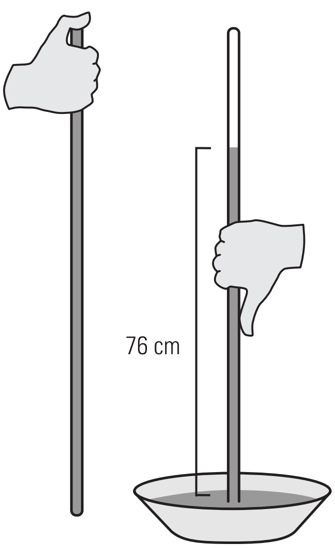
¿Cuál es la presión del aire, en atmósferas, de un neumático de automóvil que está inflado a 32 lb/plg^2?

Solución:

32 lb/plg^2 = 32 x 0,07 atm = 2,2 atm

Los 32 lb/plg^2 se agregan por encima de la presión atmosférica[1] (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 lb/plg^2.

Otra unidad proviene de la siguiente observación. Si se llena con agua un tubo muy largo cerrado en un extremo y se lo vuelca sobre una cubeta con agua, el agua del tubo se mantiene a una altura de unos 10 metros por encima del agua de la cubeta. La columna de agua no cae porque es empujada hacia arriba por la atmósfera, mientras que en la parte superior del tubo no hay aire (hay vapor de H_2O que a temperatura ambiente tiene una presión insignificante) y por ello no hay presión. Ésta es la esencia de un *barómetro* (aparato para medir la presión).



El experimento de Evangelista Torricelli (1608-1647) permitió, en 1643, medir la presión atmosférica con un **barómetro de mercurio**.

Si se reemplaza el agua por mercurio, la columna alcanzará menor altura debido a que el mercurio es mucho más denso que el agua. En este caso, la altura será de unos 76 cm en condiciones normales (a 0ºC y a nivel del mar). Los cambios en la presión atmosférica se traducen en un ascenso o descenso del mercurio y por eso podemos usar este dispositivo como un barómetro. Tenemos entonces una nueva unidad, el cmHg[2] (centímetro de mercurio), cuya relación con otras unidades viene de la equivalencia:

76 cmHg = 1 atm = 1013,25 hPa.

[1]La diferencia entre una presión (absoluta) y la presión atmosférica se llama presión manométrica. En este ejemplo la presión manométrica es de 2,2 atm.

[2] El símbolo Hg del mercurio proviene de "Hidro argento", plata líquida en latín, el idioma de los antiguos romanos.

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[3]. 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?

En realidad los valores 12 y 8 cmHg son los valores de presión sanguínea por encima de la presión atmosférica. Esas presiones son, en realidad, 88 y 84 cmHg.

Los físicos se divierten. Un día todos los científicos muertos se reunieron en el cielo para jugar a las escondidas. En el sorteo le tocó a Einstein comenzar contando. La idea era que él contara hasta cien mientras todos se escondían y luego se dedicara a encontrarlos. Al comenzar Einstein su cuenta, todos salieron corriendo a esconderse. Todos menos Newton, quien se dedicó simplemente a dibujar en el piso un cuadrado de un metro de lado y se paró dentro de él; justo a espaldas de Einstein. Cuando Einstein terminó de contar, abrió los ojos, dio media vuelta, y se encontró a Newton parado justo delante de sus ojos.
- ¡¡Piedra libre para Newton!!, -exclamó Einstein.
- Yo no soy Newton, -dijo Newton-. Estoy parado en un área de un metro cuadrado. Por lo tanto, soy un newton por metro cuadrado. En definitiva, soy Pascal.
Y Einstein tuvo que volver a contar.

Presión absoluta y presión manométrica

Si resolvimos el interrogante anterior, ya nos habremos dado cuenta de que los valores 12 y 8 cmHg para la presión sanguínea representan la diferencia entre la presión de la sangre y la atmosférica. Es decir que, en realidad, la presión sanguínea es (12 + 76) cmHg = = 88 cm Hg y (8 +76) cmHg = 84 cmHg, ambos valores superiores a la presión atmosférica. Para distinguir la manera de expresión decimos que los valores 88 y 84 corresponden a la presión absoluta (o presión, simplemente), mientras que los valores 12 y 8 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.

¿Puede la presión absoluta en un líquido ser negativa? ¿Y la manométrica?

La presión absoluta de un líquido no puede ser negativa. En cambio la manométrica sí puede ser negativa: en tal caso significa que la presión absoluta es inferior a la atmosférica.

Ejemplo

Se mide la presión absoluta en tres puntos de una cañería y resultan 110 cmHg, 90 cmHg y 70 cmHg. ¿Cuáles son la 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.

Densidad y peso específico

Al referirnos a fluidos es útil emplear los conceptos de peso específico y densidad. El peso específico de un cuerpo es el cociente entre su peso P y el volumen V que ocupa, mientras que su densidad δ es el cociente entre la masa m y el volumen V:

$$\rho = \frac{P}{V} \qquad \text{y} \qquad \delta = \frac{m}{V}.$$

La relación entre peso específico y densidad es la misma que entre peso y masa: $\rho = \delta \cdot g.$

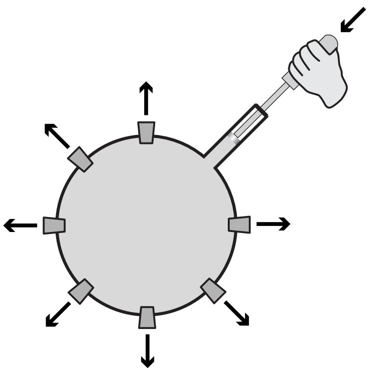
[3] Además del cmHg y el mmHg, también podemos hablar de "metros de agua" (mH_20): 10 mH_20 = 76 cmHg, aproximadamente.

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

1._b. Hidrostática

La *hidrostática* (hidro = agua) trata con fluidos en equilibrio y se aplica no sólo al agua sino a cualquier fluido. También se emplea, como aproximación, en algunas situaciones de falta de equilibrio en las que los efectos dinámicos son de poca monta. En aquellos casos en los que los efectos dinámicos son importantes, debemos aplicar la hidrodinámica, que veremos más adelante.

Principio de Pascal

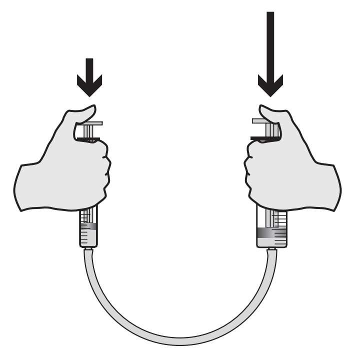

Jeringa de Pascal

Los cambios de presión en cualquier parte de un fluido encerrado y quieto se transmiten sin alteración a todo el fluido. Esos cambios modifican la fuerza que el fluido ejerce perpendicularmente sobre las paredes del recipiente. Para comprobarlo, se puede realizar la experiencia de ejercer una fuerza sobre el émbolo en el extremo superior de un recipiente esférico lleno de agua, con orificios tapados mediante corchos. Al ir aumentando el valor de la fuerza (y con ello la presión), llega un momento en que todos los corchos se salen simultáneamente, demostrando que la presión se transmitió a todos los lugares por igual. La incompresibilidad de los líquidos hace que, en la práctica, la transmisión de la presión en todas las direcciones sea casi instantánea, cosa que no ocurre con los gases, que frente a una solicitación externa experimentan un cambio de volumen.[4]

Aplicación: la prensa hidráulica

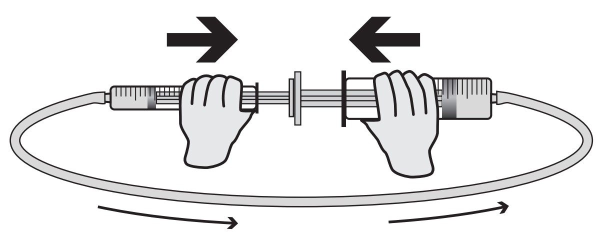
La prensa hidráulica es un dispositivo que permite modificar mucho el valor de la fuerza aplicada. Esto es posible gracias a que al actuar sobre el líquido lo que resulta inalterado en la transmisión es la presión, y no la fuerza. Para entender su funcionamiento podemos recurrir a dos jeringas (sin aguja) 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. La explicación es que en ambas jeringas es igual la presión, es decir el cociente entre la fuerza y el área de la sección es igual.



$$\frac{F_{izq}}{A_{izq}} = \frac{F_{der}}{A_{der}}$$

Si enfrentamos los pistones entre sí, al empujar se igualan las fuerzas (principio de acción y reacción) y las presiones serán distintas. En este caso el líquido no estará en equilibrio: la jeringa más delgada soportará mayor presión y el líquido fluirá hacia la más gruesa.

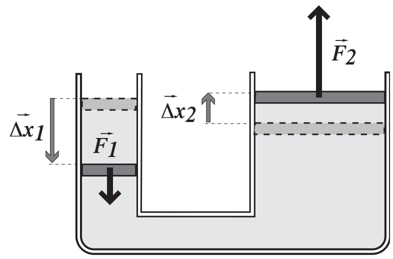


[4] En este argumento se desprecia la pequeña diferencia de presión debida al distinto nivel entre los corchos

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. El volumen de líquido desplazado por el pistón pequeño se distribuye en una capa fina en el pistón grande y el producto de la fuerza por el desplazamiento es igual en ambas ramas. Así,

$$L_{F_1} = F_1 \cdot \Delta x_1 = p_1 \cdot A_1 \cdot \Delta x_1 = p_1 \cdot \Delta V_1 = p \cdot \Delta V,$$

$$L_{F_2} = F_2 \cdot \Delta x_2 = p_2 \cdot A_2 \cdot \Delta x_2 = p_2 \cdot \Delta V_2 = p \cdot \Delta V.$$



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

Teorema Fundamental de la Hidrostática

Ya hemos dicho, aunque no demostrado, que en la base de una columna de agua de unos 10 metros de altura (en rigor, de 10,33 m) la presión es de 1 atm. Eso significa que si a nivel del mar soportamos una presión de 1 atm (la presión atmosférica), cuando nos sumergimos 10 m en el mar estaremos sometidos a una presión de 2 atm (1 atm del aire y 1 atm de los 10 m de agua). A 20 m de profundidad, la presión es de 3 atm, y por cada 10 m que se aumente la profundidad se agregará 1 atm. Además, si en vez de agua se tratara de un líquido más denso como el mercurio, el aumento de 1 atm se conseguiría con apenas 76 cm de profundidad.

Estos resultados pueden resumirse en el enunciado del ***Teorema fundamental de la Hidrostática***: *la diferencia de presión entre dos puntos de un líquido en equilibrio es proporcional a su peso específico y a la diferencia de altura entre esos puntos.*

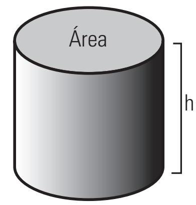
Consideraremos a la altura h como la distancia vertical medida por encima de un nivel cero de referencia arbitrario, habitualmente, el punto más bajo a considerar en la situación planteada. Entonces, el Teorema fundamental de la Hidrostática se puede expresar:

$$\boxed{\Delta p = -\rho \cdot \Delta h = -\delta \cdot g \cdot \Delta h}$$

En esta expresión Δp es la diferencia de presión entre los dos puntos y Δh la diferencia de alturas; el signo "–" indica que a mayor altura la presión es menor. Es decir:

$$p_B - p_A = -\rho \cdot (h_B - h_A) = -\delta \cdot g \cdot (h_B - h_A).$$

Esta fórmula denota que, si la presión en B es mayor que la presión en A, entonces la altura B es menor que la altura A (y viceversa).



Acorde con el Teorema fundamental de la Hidrostática, se puede calcular la presión hidrostática en la base de un cilindro de área A y altura h, que está lleno de un líquido de densidad δ, como el cociente entre el peso de la columna líquida y el área de su base.

$$p_{hidrostática} = \frac{P}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = $$

$$= \frac{\delta \cdot V \cdot g}{A} = \frac{\delta \cdot A \cdot h \cdot g}{A} = \delta \cdot h \cdot g.$$

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

Ejemplo

La presión a 5 cm de profundidad por debajo de la superficie libre de un líquido en equilibrio es 0,04 kgf/cm^2 superior a la presión atmosférica. ¿Cuál es la densidad del líquido?

Si expresamos el Teorema fundamental de la Hidrostática en términos del peso específico, tenemos:

$$p_B - p_A = -\rho \cdot (h_B - h_A) \Rightarrow \frac{p_B - p_A}{(h_B - h_A)} = -\rho$$

$$\Rightarrow \rho = -\frac{p_B - p_A}{(h_B - h_A)} = -\frac{0{,}04 \dfrac{kgf}{cm^2}}{(0 - 5\ cm)} = 0{,}008 \frac{kgf}{cm^3} = 8 \frac{kgf}{lt} .$$

Puesto que un cuerpo que pesa 8 kgf tiene una masa de 8 kg, la densidad es:

$$\delta = 8 \frac{kg}{lt} .$$